



**Universidad  
Andrés Bello®**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ANDRÉS BELLO**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela de Ciencias de la Tierra**

**DISTRIBUCIÓN DE ASOCIACIONES EVAPORÍTICAS EN  
EL SALAR DEL HUASCO REGIÓN DE TARAPACÁ,  
CHILE: ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL A TRAVÉS DE  
SENSORES REMOTOS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**Daniel Emilio Véliz González**

**Profesor Guía: Dr. Harry Esterio Gallardo**

**Miembros de la Comisión:**

**Ximena Contardo Berrios**

**Luis Ribba Gajardo**

**Viña del Mar, Chile**

**2018**



Proyecto apoyado por



# **DISTRIBUCIÓN DE ASOCIACIONES EVAPORÍTICAS EN EL SALAR DEL HUASCO REGIÓN DE TARAPACÁ, CHILE: ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

Daniel Emilio Véliz González

Profesor Guía: Dr. Harry Esterio Gallardo

Miembros de la Comisión:

Ximena Contardo Berrios

Luis Ribba Gajardo

Viña del Mar, Chile

2018

## RESUMEN

El Presente estudio está enmarcado en el convenio de colaboración entre el comité de minería no metálica de CORFO, SERNAGEOMIN y la Universidad Andrés Bello, cuyo objetivo principal fue el estudio de la distribución de las facies evaporíticas en el salar del Huasco ubicado en la primera región de Tarapacá Chile. El análisis se llevó a cabo a partir de la corrección de imágenes multiespectrales del satélite Landsat OLI/TIRS con el software ENVI, se complementó la metodología con las combinaciones de bandas 567 y validación de la identificación mineralógica con el muestreo sistemático de terreno de las costras salinas y difracción de Rayos (DRX).

La distribución de las facies evaporíticas dentro del salar es contrastado con el modelo general de salares, el cual distribuye las facies según el grado de solubilidad determinando que la distribución espacial de las evaporitas en el salar del Huasco presenta coherencias; facies insolubles carbonatos en los sectores periféricos, facies de sulfatos de solubilidad intermedia en los sectores mediales y finalmente el núcleo de halita en el sector central.

El análisis de las imágenes evidenció la existencia de una variación espacial-temporal significativa de las salmueras en los meses de verano, conocido como periodos transgresivos (periodos húmedos) versus los periodos regresivos asignados a los meses de invierno (periodos secos). Así también, se evidenció la dependencia que tienen las costras salinas con los efectos climáticos.

**Palabras claves:** geología, salar, salmuera, evapofacies minerales, imagen satelital, Landsat 8 OLI/TIRS

## **ABSTRACT**

This study was conducted at the Huasco salt flat, located in the Tarapaca Region of Chile, whose primary objective was to analyze the temporal spacial variations of the mineralogy and mineralogical facies in the summer and winter months between the years 2013-2017. to perform this investiftion, the study deals with geology, imagenery processing adquired from landsat 8 oli/tirs and from that mineralogical identification within the salt flat through spectral characteristics, bands combinations and subsequent validation of the methodology through analysis of X-Ray diffraction.

The distribution of the evaporitic facies within the salar flat is compared with the general salar flat model, which distributes the facies according to the degree of solubility that determines the spatial distribution of the evaporites, in the case of Huasco salar flat presents coherences; insoluble carbonate facies in the peripheral sectors, facies of sulfates of intermediate solubility in the middle sectors and finely the nucleus of halite in the central sector.

The analysis of these images demonstrated the existence of a significantly temporal-spacial variation of the brines in the summer months, known as transgressive periods (wet periods), versus the regressive periods (dry periods) associated with the winter months.

**Keywords:** geology, salt flat, mineral evapofacies, satellite image, Landsat 8 OLI /TIRS



*You are braver than you believe,  
stronger than you seem,  
smarter than you think, and loved more than you know...*  
(A.A. Milne).

*A mi madre, Betty González Domínguez*

## Agradecimientos

No quiero dejar de escribir y expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que estuvieron conmigo, no solo durante la etapa de este trabajo, sino que también a lo largo de mi vida social y universitaria.

Agradecer a las instituciones que estuvieron involucradas en este proyecto, CORFO y SENAGEOMIN.

Mencionar a las personas que nos ayudaron en terreno: los amigos franceses Antoine Blanchet y Camille Guérout y por supuesto a don Rubén Galleguillos de Pica.

Agradezco, a todos los profesores que siempre tuvieron un momento y espacio para transmitir sus conocimientos, experiencias y comentarios que sin duda me ayudaron a crecer un poco cada día: Sergio Calderón, Iván Vargas, Harry Esterio, Francisco Fernandoy, Heidi Aguad, Daniel Muñoz, Cristian Rodrigo, Brenda Morales, Carla Bobadilla, Diego Letelier, José Araos, Cristóbal Ramírez, Manuel Vásquez, Pedro Santis, Benigno Godoy, Luis Ribba, Irene Aracena, Edmundo Tulcanaza y en especial mención a Jaime Aguilera por su tiempo en aclarar dudas sobre el procesamiento de las imágenes multiespectrales, y por supuesto a la Directora de Carrera Ximena Contardo quién **sin su gran ayuda** y gestión nada de esto hubiese sido posible.

A las personas de Exploraciones mineras EMSA, que fueron parte fundamental en mi desarrollo como profesional: Mónica Vukasovic, Juan Carlos Toro, Jullian Bass, Benjamín Echeverría, Pablo Fuentes, Paulina Olcay y Patricio Cuadra.

Agradezco también a las personas que me ayudaron y me abrieron sus puertas al momento de llegar a una ciudad nueva, en la casa de Habana de Recreo: Sra. Flor, Vanessa Pineda, Francisca Pineda y don Eduardo Pineda quienes me acogieron como un integrante más de su familia, también en la casa de Caleta Higerillas a la Yeya por su preocupación y ricas comidas de todos los días.

A la Familia Foucher Mc Coll Calvo, mi segundo hogar en la quinta región, muchas gracias por cada momento, cariño y preocupación.

Agradezco a todas esas personas que hicieron un poco menos complejo mi paso por la UNAB: a Ximena Toledo quien estuvo a cargo y pendiente de las necesidades de todos los terrenos y laboratorios, a mis amigos y compañeros de clases quienes siempre compartimos risas, boulling entre nosotros, tallas y conocimientos (El rompehielos Philippi): Gonzalo N., Nicolás P., Jaime C., Rudolph H., Diego R., Diego Z., Harald J., Javier P., Rodrigo M., Y Stefano P. A Daniela C., Consu A. y Francisca C., Catalina B. y Román K.

Agradecer a todos estos años por su incondicional ayuda, paciencia, cariño, amor y vivencias juntos. Nicole Foucher, un beso para ti.

A mis amigos de Antofagasta: Jaime C., Cathalina M., Pan con palta Nicole G., Rolando A., Alfredo E., Francisca C. Ricardo G, y Debi F.

En el tiempo de la tesis agradecer a Julia Stanisz, quien me dio siempre su apoyo y preocupación desde Boulder, Colorado (EE. UU.).

A mis tías: Pollet, Susan, Alejandra, Viviana, Rosa, Evelyn, primos hermanos y madrina Silvia. Como no acordarme de ellos, mis abuelitos que ya no están conmigo: Juan Gonzalez Fritz y Daysi Domínguez Miranda, sé que estarían orgullosos de esto, me hubiese gustado compartirlo y vivirlo con ustedes, los llevo siempre en mi memoria y corazón.

Y finalmente quiero agradecer a mis padres Fernando y Betty: no existen palabras para describir el apoyo, paciencia, amor inmensurable, estoy acá gracias a ustedes. Y por supuesto a mis maravillosas hermanas Verónica y Fernandita, y sobrinito Baltazar.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Consideraciones generales .....	1
1.2. Problema de investigación.....	2
1.3. Objetivo general.....	2
1.4. Objetivos específicos .....	2
1.5. Hipótesis de trabajo .....	3
1.6. Ubicación y accesos alar de Huasco .....	3
1.7. Clima.....	4
1.8. Flora y fauna.....	5
2. ANTECEDENTES .....	8
2.1. Antecedentes geológicos.....	8
2.1.1. Salar del Huasco .....	9
2.2. Antecedentes hidrogeológicos e hidrogeoquímicos en la región de Tarapacá .....	10
2.2.1. Antecedentes hidrogeológicos e hidro geoquímicos en el salar del Huasco	10
2.3. Antecedentes espectrales.....	11
3. MARCO TEÓRICO.....	13
3.1. Conceptos relevantes para este trabajo .....	13
3.1.1. Salar.....	13
3.1.2. Tipos de salares.....	14
3.1.3. Salmueras .....	16
3.1.4. Evaporitas .....	17
3.1.5. Zonación mineral.....	19
3.2. Sensores remotos y satélites.....	21

3.2.1.	Sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper-Plus) de Landsat 7 ..	21
3.2.2.	Sensor ASTER (Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer) .....	22
3.2.3.	Sensor OLI/TIRS de LANDSAT 8.....	23
4.	Metodología de trabajo.....	24
4.1.	Etapa de pre terreno .....	25
4.2.	Etapa de terreno .....	26
4.3.	Etapa Post Terreno.....	26
4.4.	Procesamiento de imágenes satelitales LANDSAT .....	26
4.4.1.	Calibración radiométrica.....	27
4.4.2.	Corrección atmosférica Módulo FLAASH de ENVI 5.4.....	29
4.4.3.	Transformación Minimum Noise Fraction (MNF).....	33
4.4.4.	Transformación Minimum Noise Fraction Inverse (MNF Inverso) .	35
4.4.5.	Construcción de Máscara a partir de Matemática de bandas .....	36
4.4	Análisis de firma espectral.....	38
4.5.	Análisis de difracción de rayos X (DRX) .....	39
4.6.	Análisis espacio temporal .....	40
5.	MARCO GEOLÓGICO .....	41
5.1.	Evolución geotectónica .....	41
5.2.	Geología local.....	43
5.3.	Geología del salar del Huasco.....	43
5.3.1.	Rocas estratificadas .....	43
5.3.2.	Rocas intrusivas .....	48
5.4.	Geomorfología .....	50
5.4.1.	Geomorfología regional.....	50
5.5.	Geomorfología Local.....	52

5.5.1.	Relieves volcánicos.....	53
5.5.2.	Relieves estructurales y de erosión.....	53
5.5.3.	Relieves de acumulación .....	54
5.6.	Hidrología e hidrogeología del salar del Huasco .....	55
5.6.1.	Hidrología.....	55
5.6.2.	Hidrogeología del salar del Huasco.....	57
6.	RESULTADOS .....	61
6.1.	Geología del salar del Huasco.....	61
6.1.1.	Litologías.....	61
6.1.2.	Morfologías de las costras salinas .....	66
6.2.	Aplicación de combinación de bandas con Landsat 8 OLI/TIRS .....	67
6.2.1.	Litologías del Salar del Huasco con imagen LANDSAT 8 sensor OLI 67	
6.3.	Definición de zonas de interés de muestreo y firma espectral.....	70
6.4.	Aplicación de firma espectral en región de interés (ROI).....	72
6.4.1.	Análisis de firma espectral con ROI en Carbonatos.....	73
6.4.2.	Análisis de firma espectral con ROI en Yeso .....	74
6.4.3.	Análisis de firma espectral con ROI sulfatos .....	75
6.4.4.	Análisis de firma espectral de ROI Halita (NaCl).....	77
6.5.	Muestreo de costra salina.....	78
6.6.	Análisis de difracción de rayos X (DRX) .....	80
6.7.	Mapa de evapofacies del salar del Huasco .....	81
6.8.	Análisis espacio temporal .....	83
6.8.1.	Análisis espacio temporal para meses de verano .....	83
6.8.2.	Análisis espacio temporal para los meses de invierno .....	85
7.	DISCUSIÓN .....	89

8. CONCLUSIONES.....	92
9. VIII. REFERENCIAS .....	96
10. ANEXO.....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de ubicación de la zona de estudio y principales vías de accesos.	4
<b>Figura 2.</b> Principal flora del salar del Huasco	6
<b>Figura 3 .</b> Principal fauna del Salar del Huasco	7
<b>Figura 4.</b> Modelo esquemático de un salar	13
<b>Figura 5.</b> Evolución de una salmuera a partir de una salmuera primitiva	16
<b>Figura 6.</b> Esquema teórico de la zonación salina en los salares	19
<b>Figura 7.</b> Modelo concéntrico ideal de zonación mineral de las costras salinas.	20
<b>Figura 8.</b> Metodología para el análisis espacio temporal a partir de sensores remotos.	25
<b>Figura 9.</b> Imagen satelital sin procesar del área del Salar del Huasco, 1:1.000.000, USGS	28
<b>Figura 10.</b> Comparación de imagen satelital natural y e imagen satelital con calibración modulo FLAASH (reflectancia normalizada).	32
<b>Figura 11.</b> Imagen satelital del salar del Huasco separadas por banda	34
<b>Figura 12.</b> Imagen satelital MNF invertida con banda 7 corregida con MNF inverso.	36
<b>Figura 13.</b> Construcción y aplicación de máscara a zonas de alta reflectancia delimitados en gris. Imagen en escala de grises	37
<b>Figura 14.</b> Comparación de espectros de mineral Alunita con sensor Landsat 5 Sensor TM, MODIS y análisis de laboratorio	39
<b>Figura 15.</b> Mapa geológico de salar del Huasco y Coposa 1: 250.000.	49
<b>Figura 16.</b> Mapa Geomorfológico del Norte Grande de Chile	52
<b>Figura 17.</b> Mapa geomorfológico de la cuenca del salar del Huasco	55
<b>Figura 18.</b> Mapa de ubicación de transecta del perfil hidrogeológico, principales sectores del salar del Huasco y manantiales.	59
<b>Figura 19.</b> Perfil hidrogeológico del salar del Huasco y sus principales unidades Hidrogeológicas	60
<b>Figura 20.</b> Afloramientos de la Ignimbrita Huasco.	62
<b>Figura 21.</b> Afloramientos del sector de pampa Rinconada de la Ignimbrita Huasco.	63
<b>Figura 22.</b> Afloramientos correspondientes a estratovolcanes intensamente erosionados.	64
<b>Figura 23.</b> Principales depósitos de cobertura aluvial y eólico del salar del Huasco.	65
<b>Figura 24.</b> Principales morfologías identificadas en las costras salinas del salar del Huasco.	67



<b>Figura 25.</b> Composición de color de Landsat 8 sensor OLI con reflectancia de bandas 5, 6, 7 en RGB. ....	69
<b>Figura 26.</b> Mapa preliminar del salar del Huasco con zonas de interés de muestreo de costra salina a partir del análisis de firmas espectrales. ....	71
<b>Figura 27.</b> Firma espectral de los valores promedios de reflectancias de los grupos minerales analizados a partir de ROIs. ....	72
<b>Figura 28.</b> Firma espectral de ROI carbonatos vs carbonatos comunes presentes en los salares.....	73
<b>Figura 29.</b> Firma espectral de ROI Yeso con librería espectral.....	74
<b>Figura 30.</b> Firma espectral de ROI sulfatos con librería espectral.....	76
<b>Figura 31.</b> Firma espectral de ROI Halita con librería espectral.....	77
<b>Figura 32.</b> Mapa de puntos muestreo en el salar del Huasco. ....	78
<b>Figura 33.</b> Principales asociaciones mineralógica evaporítica en el sector norte del salar del Huasco .....	79
<b>Figura 34.</b> Mapa de zonación mineral del salar del Huasco, realizado a partir de procesamiento de imagen satelital LANDSAT 8. ....	82
<b>Figura 35.</b> Analisis espacio temporal del salar del Huasco .....	84
<b>Figura 36.</b> Comparación entre combinación de bandas para zonas húmedas dentro del salar del Huasco en RGB.....	85
<b>Figura 37.</b> Analisis espacio temporal del salar del Huasco 2014 – 2017. ....	87
<b>Figura 38.</b> Comparación de espacio temporal para los cuerpos de agua en los meses de invierno y verano del año 2016, LANDASAT 8 OLI/TIRS en RGB. ..	88
<b>Figura 39.</b> Modelo preliminar de distribución de facies evaporíticas en el salar del Huasco.....	92
<b>Figura 40.</b> Comparación de meses de verano para los años 2013 y 2015. ....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Principales tipos de salares y ambientes de formación. ....	15
<b>Tabla 2.</b> Principales minerales evaporíticos en las salmueras .....	18
<b>Tabla 3.</b> Características principales del sensor ETM+ .....	22
<b>Tabla 4.</b> Características principales de sensor ASTER y subsistemas VNIR, SWIR y TIR.....	23
<b>Tabla 5.</b> Características principales del sensor OLI y TIRS .....	24
<b>Tabla 6.</b> Metadatos de la imagen satelital Landsat 8.....	28
<b>Tabla 7.</b> Valores de calibración radiométrica de Imagen LANSAT 8. ....	29
<b>Tabla 8.</b> Modelos de corrección atmosférica y constantes de los parámetros de vapor de agua y temperatura de aire-superficie .....	30
<b>Tabla 9.</b> Valores aplicados para la calibración de módulo FLAASH, Salar del Huasco.....	31
<b>Tabla 10.</b> Resultados valores de la imagen satelital con MNF. ....	34
<b>Tabla 11.</b> Comparación de las estadísticas de las bandas de la imagen antes y después de la aplicación del MNF inverso.....	35
<b>Tabla 12.</b> Datos y fechas de las imágenes satelitales satélite LANDSAT 8 OLI/TIRS.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Tabla 13.</b> Estaciones pluviométricas de la cuenca del salar del Huasco y valores pluviométricos acumulados (mm) registrados en los meses de verano (enero - febrero) y meses de invierno (julio - agosto) 2014-2017	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Tabla 14.</b> Ejmplo estudio de un periodo de 20 años de seguimiento en el área del salar del Huasco. ....	90

## 1. INTRODUCCIÓN

Esta memoria de Título está sujeta al Convenio de Colaboración entre la Universidad Andrés Bello (UNAB) y el Comité de Minería no Metálica (CNMM) de CORFO, cuyo fin es establecer vías de colaboración entre ambas entidades facilitando la ejecución y desarrollo de programas de investigación conducentes a tesis de pregrado o postgrado.

### 1.1. Consideraciones generales

Las cuencas alto-andinas entre los 18° - 20° Latitud Sur en el norte de Chile, se ubican entre los 3.800 - 4.000m s.n.m, están asociadas a condiciones climáticas áridas, depresiones geomorfológicas con características endorreicas y a escasa agua superficial. Estas cuencas se desarrollan en base a escorrentía y posterior infiltración generando bofedales y humedales en las zonas más bajas de la cuenca e interactuando con acumulaciones evaporíticas ([Acosta, 2004](#)).

Las cuencas endorreicas del altiplano alojan depósitos salinos de tipo salar las que interactúan con rocas volcánicas del Terciario superior - Cuaternario sobreyaciendo al basamento Mesozoico-Paleozoico ([Chong et al., 2000](#)). Los salares son considerados como entidades dinamo-sedimentarios controlados por la combinación de factores morfológicos, hidrológicos y climáticos ([Chong, 1988](#)). Estos dos últimos parámetros, controlan las fuentes hídricas de los salares, por ende, las aguas subterráneas, fuente principal utilizada para el consumo de las poblaciones y desarrollo de la industria en el altiplano chileno ([Achurra, 2010](#)).

La estrecha relación entre los depósitos salinos y el clima determina que estos constituyan unidades geomorfológicas cinemáticas, que sufren cambios o variaciones composicionales y estructurales en ciclos diarios, permitiendo de esta manera diversos tipos de costras salinas ([Vila, 1975](#)) y asociaciones minerales diferentes.

## **1.2. Problema de investigación**

El salar del Huasco ha sido objeto de estudios que integran la geología regional de la cuenca del salar, análisis en el sistema hídrico y modelos hidrogeológicos, todos realizados por instituciones como la Dirección general de Aguas (DGA) y la Universidad Católica, mediante convenios de colaboración y otras instituciones privadas. Sin embargo, no se han realizado estudios en sensores remotos aplicados al salar del Huasco, herramienta accesible y de bajo costo, que permite identificar los diferentes tipos de costras salinas y su distribución.

En Chile, no se han realizado estudios en sensores remotos aplicados al salar del Huasco, herramienta accesible y de bajo costo, el cual permite identificar zonación mineral en las costras salinas a través de combinaciones de bandas espectrales.

## **1.3. Objetivo general**

Analizar la variación espacio temporal de la distribución de las facies evaporíticas en el salar del Huasco a partir de sensores remotos.

## **1.4. Objetivos específicos**

- a. Reconocer y validar las principales unidades geológicas del área.
- b. Determinar la mineralogía y su distribución mediante imágenes multiespectrales.
- c. Realizar un mapa de asociaciones minerales mediante herramientas GIS y ENVI.
- d. Establecer, si existe, una variación espacio temporal de la zonación mineralógica asociada a las variaciones climáticas.
- e. Validar la identificación de imágenes multiespectrales a partir del análisis de difracción de Rayos X con las muestras obtenidas en terreno.

### **1.5. Hipótesis de trabajo**

Actualmente los sensores remotos son capaces de identificar minerales y otros elementos asociados a partir de la combinación de bandas, Band ratios y firmas espectrales de los minerales evaporíticos. En base a lo anterior, es posible reconocer e interpretar la distribución y variación en el tiempo de los minerales evaporíticos en el Salar del Huasco en un determinado periodo.

### **1.6. Ubicación y accesos salar de Huasco**

El salar del Huasco se ubica en la cuenca del salar homónimo, y corresponde a una cuenca endorreica ubicada en el borde occidental del altiplano chileno en la I Región de Tarapacá, provincia de Iquique, comuna de Pica (Figura 1).

Para acceder al salar desde Iquique se debe ingresar a la autopista Humberstone - Iquique vía expreso norte ruta 16 hasta conectar con la ruta 5 hasta la localidad de Pozo Almonte, en este punto hay dos alternativas:

- ✓ Tomar la ruta A-65 cuyo camino es asfaltado (97 km) hasta el cruce con A-685 para ingresar a la ruta A-675, camino de tierra de 10 km.
- ✓ Seguir la ruta 5 e ingresar a la ruta asfaltada A-665 hasta la localidad de Pica, luego seguir por la ruta A-685 cuyo camino es asfaltado y tierra hasta el cruce con la A-675.

Se requiere el acceso al salar con vehículo al menos 4x2 y circular por caminos establecidos que bordean el salar.



**Figura 1.** Mapa de ubicación de la zona de estudio y principales vías de accesos, I Región de Tarapacá, Chile.

## 1.7. Clima

Gran parte del norte de Chile presenta aridez extrema en altitudes bajo los 2.000m s.n.m y por sobre estas altitudes se presentan condiciones de aridez o semi aridez como en el caso del salar del Huasco ([Montgomery y Harshbarger, 1985](#)).

La Cuenca que alberga el salar del Huasco presenta dos tipos de climas predominantes. El primero corresponde al clima de tundra, producto de ubicación altimétrica con precipitaciones estivales. El segundo a un clima desértico o marginal de altura, con características ambientales secas y temperaturas frías ([Flores, 2010](#)). A su vez, la dinámica climática de la cuenca está sujeta a extremas variaciones estacionales producto de precipitaciones de origen convectivo, que se producen a partir del ascenso de aire cargado de humedad desde la ladera oriental de la cordillera principal de los Andes.

En cuanto a las temperaturas, el salar del Huasco presenta temperaturas medias de 5°C durante todo el año, temperaturas mínimas de -20°C en estaciones de invierno y temperaturas máximas de 20°C en verano.

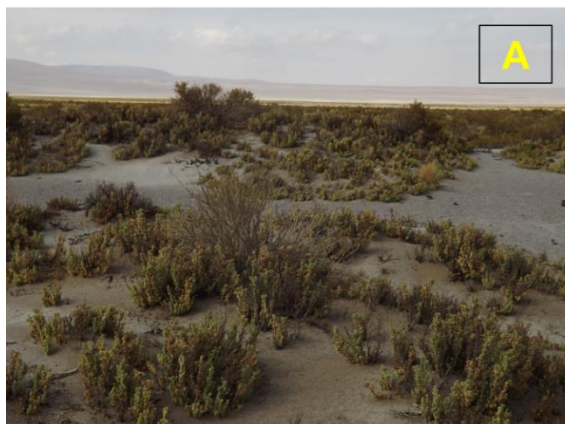
### **1.8. Flora y fauna**

El salar del Huasco presenta una gran zona de humedales en donde existe una gran diversidad de flora y fauna típica alto andina, de modo que son determinantes e importantes en el funcionamiento del ecosistema. Debido a lo anterior, el salar ha sido declarado el 2 de diciembre de 1996 con 6000 ha en el listado de sitios RAMSAR, que se define como un tratado internacional sobre el cuidado y catastro de todas las reservas de agua (extensiones de marismas, pantanos y humedales) más importantes a nivel mundial.

Por cuanto a la flora es posible identificar en los sectores que bordean el salar distintas especies vegetales halófilas junto a las lagunas y afloramientos de agua especies como la Tola (*Baccharis boliviensis*) (Figura 2a), Helechos (*Cheilanthes puinata*), Pasto Iro (*Festuca orthophylla*) (Figura 2b), Rica – Rica (*Acantholippia punensis*), Llareta (*Azorella compacta*) (Figura 2c), Pako macho (*Oxychloe andina*), Llaletilla (*Pycnophyllum bryoides*) (Figura 2d) y Lampayo (*Lampayo aratae*) (Figura 2e).

Por otro lado, la fauna del salar es completamente variable y dependiente del recurso hídrico disponible en la cuenca, es posible reconocer aves como el Suri (*Pterocnemia pennata tarapacensis*) perteneciente a la familia de los avestruces (Figura 3a), Ganso andino (*Chloephaga melanoptera*) (Figura 3b), variados flamencos (Figura 3c), mamíferos como el puma (*Felis concolor*), el zorro andino (*Pseudalopex culpaeus*), el gato colocolo (*Felis colocola*), el roedor Tuco-tuco (*Ctenomys fulvus*), la vizcacheta (*Lagidium peruanum*), y Camélidos altiplánicos como el Guanaco y la Alpaca (3d y 3e).





**Figura 2.** Principal flora del salar del Huasco (Visita terreno 28/01/18). a: *Tola*, b: *Pasto Iro*, c: *Llaretilla*, d: *Llaretilla*, e: *Llampayo*





**Figura 3** . Principal fauna del Salar del Huasco, (Visita terreno 28/01/18). A: Ave Suri, B: Ganso Andino, C y D: camélidos andinos.

## 2. ANTECEDENTES

Los primeros estudios realizados en la franja occidental de los salares en la I Región comenzaron en la década del 60, siendo realizados por entidades privadas como estatales. Trabajos que inicialmente tuvieron como objetivo la aplicación de metodologías exploratorias para la búsqueda de nuevos recursos minerales e hídricos a partir de descripciones geológicas, mineralógicas y evaluación de los niveles piezométricos. Estos trabajos tuvieron por objetivo comprender de manera general la dinámica de los depósitos salinos y su potencial económico. Los principales estudios pueden clasificarse en tres grandes grupos, los que representan las mayores temáticas aplicadas al salar del Huasco: antecedentes geológicos, antecedentes hidrogeológicos-hidrogeoquímicos y antecedentes espectrales.

### 2.1. Antecedentes geológicos

Los trabajos confeccionados en el área de estudio, datan desde principios de 1960 en la Región de Tarapacá, al igual que los primeros reconocimientos y levantamientos geológicos a nivel regional, estos fueron impulsados principalmente por el ex Instituto de investigaciones geológicas (IIG) y otras instituciones públicas como privadas, las cuales tuvieron como objetivo reconocer y definir las unidades litoestratigráficas, y la búsqueda de nuevos recursos minerales metálicos como no metálicos (bentonita, alumbres y boratos) a través de la exploración y posteriormente la explotación ([Vergara y Thomas, 1984](#); [García et al., 2004](#)).

Por otra parte, los estudios geológicos a escala regional siguen la tendencia al estudio del desarrollo y reconstrucción paleogeográfica de los Andes Centrales y a las unidades morfoestructurales Alto Andinas, a partir del análisis estructural y estilo de deformación entre las unidades Cenozoicas, mediante estudios geocronológicos informados por [Christensen et al. \(1969\)](#), [Backer \(1977a, 1977b\)](#), [Huete et al. \(1977\)](#) y [Ware y Munchmeyer \(1981\)](#).

### 2.1.1. Salar del Huasco

En la primera región de Tarapacá, los trabajos más significativos corresponden a [Vergara y Thomas \(1984\)](#), que realizaron un levantamiento geológico de 4.500 km<sup>2</sup> de superficie en la Hoja Collacagua (Carta N°59), incluyendo a los salares del Huasco y Coposa, definiendo rocas estratificadas de edades del Paleozoico superior al presente.

[Villemur \(1964\)](#) realiza la descripción de la geología y estratigrafía en el área suroccidental desde el punto de vista geológico regional y [Sayes \(1978\)](#) define y describe unidades Jurásicas en el sector norte en los cuadrángulos Collacagua y salar del Huasco.

Estudios realizados por el servicio nacional de geología y minería (SERNAGEOMIN) corresponden a [Gajardo y Carrasco \(2006\)](#), quienes llevaron a cabo un muestreo en el sector central del salar para determinar concentraciones de litio, potasio y boro en las salmueras. Este estudio se completó con un el análisis de elementos mayores y Difracción de Rayos X, determinandosulfatos de sodio, calcio y halita. [Ercilla y Carrasco, \(2012\)](#) realizan un trabajo bibliográfico sobre los estudios realizados hasta le fecha en los salares de la Región de Tarapacá.

[Navarrete \(2012\)](#) detalla el registro estratigráfico de la zona al noroeste de la cuenca del salar de Coposa a través de la descripción litológica a partir de 4 sondajes diamantinos abarcando un total de 1.600m de profundidad.

[Gallardo \(2015\)](#), realiza un estudio al noroeste del salar de Coposa, para dilucidar la contribución de los periodos compresivos y su efecto en el alzamiento de los andes centrales en la Región de Tarapacá.

## **2.2. Antecedentes hidrogeológicos e hidrogeoquímicos en la Región de Tarapacá**

A escala regional, los primeros trabajos enfocados en el análisis hídrico corresponden a [Grilli y Vidal \(1986\)](#) los que proponen el estudio de la evaporación como metodología para estimar el potencial del recurso hídrico en los salares de la I, II y III Región, incluyendo los salares Huasco y Coposa. Otros análisis de carácter regional, corresponde al estudio realizado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (DIHA) de La Pontificia Universidad Católica para la dirección general de aguas (DGA) ([DGA-PUC, 2009](#)) que tuvo por objetivo el levantamiento de generación y análisis de información hidrogeológica para evaluar el estado de los recursos hídricos del altiplano chileno, por medio del estudio hidroquímico de las lagunas, balance hídrico de lagunas y salmueras, y calidad de las aguas de aporte. Adicionalmente identifican las vías evolutivas para las lagunas y salares.

Los intentos por dilucidar el origen de las aguas y salmueras corresponden a [Risacher et al, \(1998, 2004\)](#) y [Lagos \(2016\)](#), quienes intentaron establecer la relación entre los salares de las distintas regiones del norte grande de Chile y los salares de Bolivia.

### **2.2.1. Salar del Huasco**

En términos generales, los salares Huasco y Coposa son analizados como sistemas únicos, debido a su relación espacial y características hidrogeológicas similares. Los primeros trabajos corresponden a [Montgomery \(1985\)](#), quien realizó un análisis y estimación del potencial hídrico a partir de los resultados de bombeo de pozos de exploración y de producción en el salar del Huasco, así también en el mismo salar, [Grilli y Vidal \(1986\)](#) implementaron técnicas para la evaluación y desarrollo de este recurso a través de ensayos de evaporación y análisis de balance Hídrico. Este último, ha sido desarrollado por nuevos trabajos enfocados en la estimación de recarga y descarga de agua subterránea en la

cuenca de los salares [Collahuasi y DICTUC \(2006\)](#), [Rojas y Salazar \(2010\)](#) y [Flores \(2016\)](#).

La explotación del recurso hídrico y contaminación, han sido motivación para nuevos trabajos de investigación. [Acosta y Custodio, \(2008\)](#) llevan a cabo una evaluación y análisis sobre impacto de la sobre explotación del recurso hídrico, en base a ello entregan información del impacto de futuras explotaciones para la industria minera, mediante de la evaluación de la magnitud y variabilidad espacial de las recargas. Por su parte [Herrera et al, \(2009\)](#) realizó un análisis y estimación de concentración de metales y metaloides de interés ambiental encontrados en los salares del Huasco y Coposa.

### **2.3. Antecedentes espectrales**

La publicación y utilización de sensores remotos aplicados en salares y/o ambientes salinos son escasos. Entre la gama de trabajos destacan las publicaciones de la revista internacional de teledetección (*International Journal of Remote Sensing*). La gran mayoría de estos trabajos corresponden a países que contienen depósitos salinos, lagos salinos y/o asociados, donde Bolivia, Túnez, Turquía y Chile se adjudican los lugares más relevantes.

Los trabajos espectrales en Bolivia comienzan con [Sabins y Miller, \(1994\)](#), quienes trabajan con Imágenes de Landsat TM y AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) para la exploración de salmueras con asociación boratífera, utilizando el sensor TM con la combinación de banda 4/7, lo suyo hace [Posadas et al. \(2005\)](#) con la búsqueda de Ulexita usando igual combinación. [Ponzoni \(2000\)](#) realiza el análisis espacio temporal de la zonación mineralógica del salar de Uyuni a partir del cálculo del coeficiente de variación de píxel (VC) y estabilidad espectral con imágenes del sensor TM de LANDSAT 5. En el mismo salar [Camargo et al. \(2004\)](#) lleva a cabo el análisis de estabilidad temporal el cual recomienda la utilización de los ambientes salinos evaporíticos para la calibración de sensores producto de su alta homogeneidad espectral y deleznales efectos atmosféricos.

Otras metodologías en el análisis espectral en el mismo país corresponden a [Cáceres y Pirard \(2004\)](#), quienes hacen lo suyo con el análisis espectral y cartografía del salar Sud de Lipez, con aplicación de la técnica de desmezcla espectral en el captor multiespectral ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*).

Los salares ubicados al norte de África y Europa sur occidental, también han sido objeto de estudios, en ellos se destacan los trabajos de [Bryant \(1999\)](#) en el lago salino del Sahara *Chott el Djerid* (Túnez). El autor analiza la distribución espacial de minerales evaporíticos como depósitos de yeso, halita y otros cloruros como la carnalita, a partir de imágenes satelitales del captor TM (*Thematic Mapper*). Similarmente [White y Drake, \(1994\)](#) analizan imágenes Landsat TM con el propósito de obtener la abundancia y distribución de yeso en el lago de sal endorreico de *Chott Fedjaj*, Túnez.

En Turquía, [Kargi, \(2007\)](#), lleva a cabo el trabajo de la exploración de los depósitos de boratos en la región de Bigadiç. Trabaja con la aplicación y adaptación del método PCA (análisis de componentes principales) y valida el método para mapear minerales de boratos en sensor TM Landsat.

En Chile, las publicaciones de trabajos asociados a la aplicación de sensores remotos en salares son resucidos, entre los primeros trabajos destaca lo realizado por [Chapman et al, \(1989\)](#), quien fue el primero en utilizar imágenes satelitales del sensor TM en salares en nuestro país. El autor emplea la técnica “*decorrelation stretching*” para la cartografía del salar de Atacama.

Recientemente, se destaca el trabajo de [Flahaut et al, \(2016\)](#), quien identifica minerales hidratados, ensambles minerales (sulfatos cálcicos, sulfatos sódicos) y valida la metodología partir de análisis de Difracción de Rayos X (DRX) en el Salar de Atacama, Aguas calientes 1, 2 y 4, Salar de Quisquiro, Salar de Capur, Laguna Tuyajto y Salar del Laco, para luego aplicar dicha metodología en el planeta Marte.



### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Conceptos relevantes para este trabajo

##### 3.1.1. Salar

Un salar corresponde a un cuerpo de origen sedimentario (Evaporítico- Detrítico) ubicado en las zonas más bajas de una cuenca endorreica en condiciones de aridez extrema (Figura 4), típicamente en un ambiente desértico o semidesértico (Chong, 1988). Este tipo de ambiente genera una alta tasa de evaporación por sobre las precipitaciones, lo que gatilla una acumulación y depositación de sales.

La distribución de las sales está condicionada por los factores hídricos del sistema, ello indica que dependen de las entradas (Precipitaciones) y las salidas o descargas (Evaporación) en el salar.

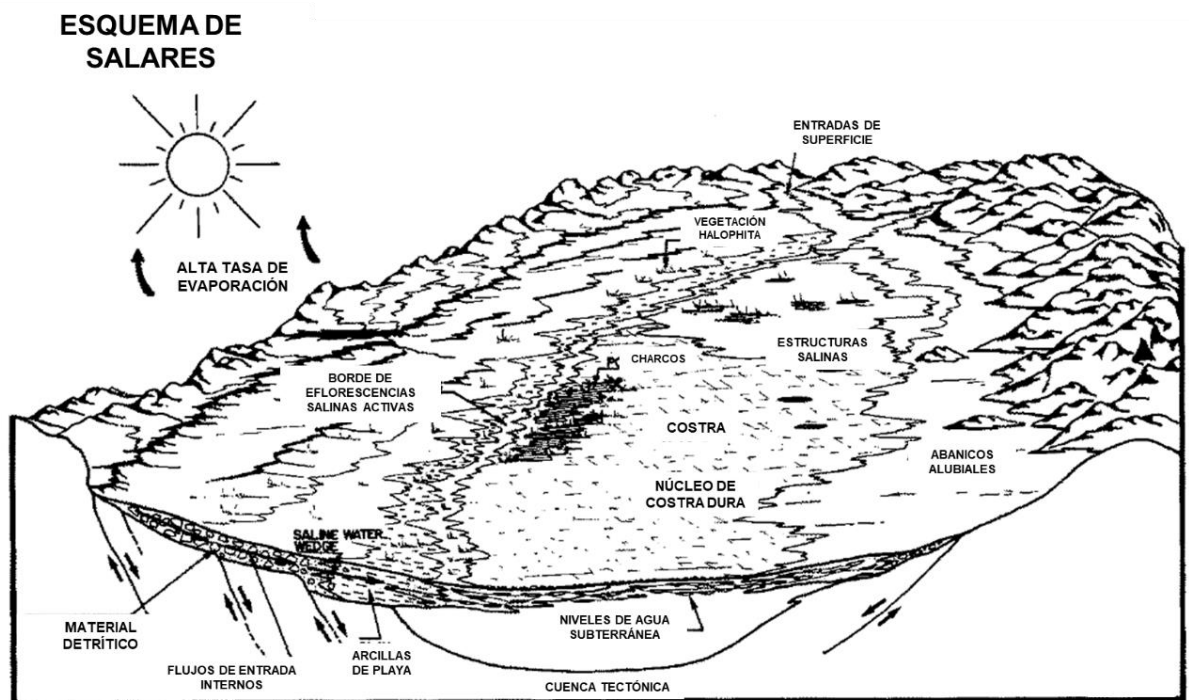


Figura 4. Modelo esquemático de un salar. Modificado de Chong (1988).

### **3.1.2. Tipos de salares**

La clasificación de los salares no es concreta y definida, diversos autores han intentado realizar un desglose de los tipos de salares a partir de factores geológicos y tectónicos. Sin embargo, estos podrían modificarse debido a los intereses económicos y utilización de nuevas herramientas y tecnología en el futuro.

[Chong \(1988\)](#), realiza una clasificación preliminar para los salares (Tabla 1), según la geología, ubicación geográfica, edad geológica, mineralogía (evaporitas), naturaleza de las salmueras y/o costras o según sus aspectos económicos.

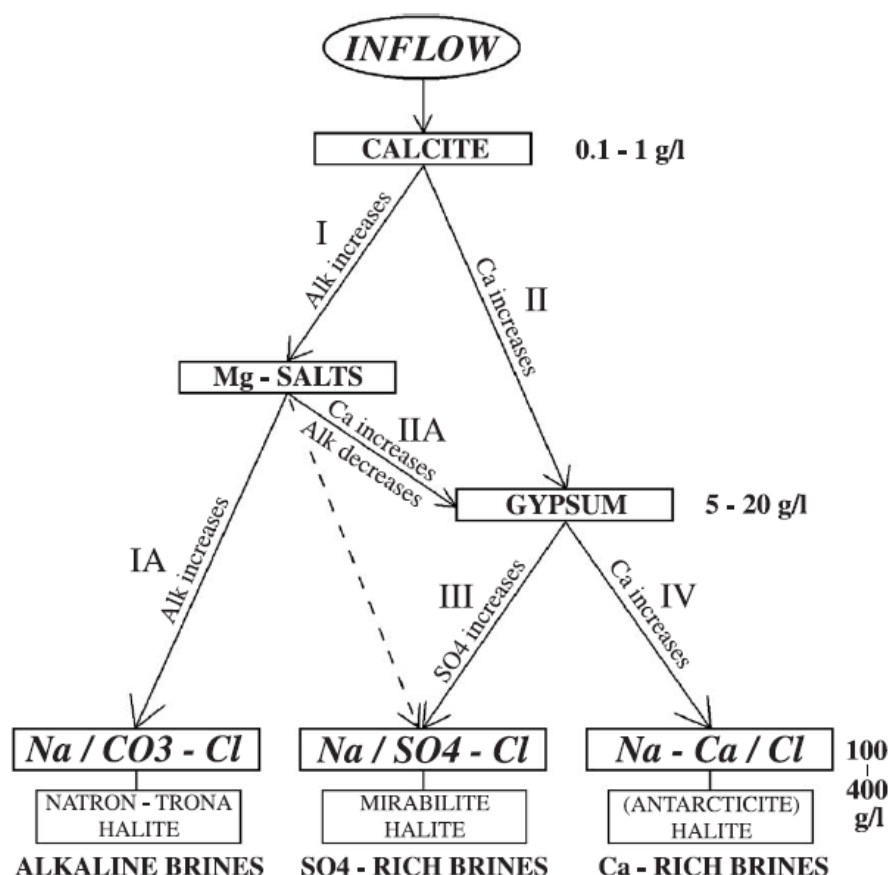


**Tabla 1.** Principales tipos de salares y ambientes de formación (Chong,1988).

<b>Ambiente continental</b>	En cuencas de los Andes Altos	Lagos salinos andinos y salares andinos	—
	En cuencas Pre Andinas	Salares Pre andinos	—
	En la depresión central	Nitratos y sales asociadas	Aluvial
			En Rocas
			En salares
		Depósitos sulfatados de Sodio	—
		Depósitos de Ulexita	—
		Salares Estratificados	—
		Salares de las Pampitas	—
		Domos	—
	En cuencas de la Cordillera de la Costa	Salar Grande	—
	Depósitos misceláneos con diferente configuración geológica	Suelos salinos o regolito salino	—
		Horizontes de yeso "Panqueques"	—
		Evaporitas intercaladas con depósitos continentales	—
	Playas	—	—
<b>Ambientes transicionales</b>	Sebkhas	—	—

### 3.1.3. Salmueras

En términos básicos, una salmuera corresponde a una solución de agua que dispone de una elevada concentración de NaCl disuelta en ella. En un ambiente evaporítico, existe una salmuera primaria o primitiva la cual evoluciona según la composición y elementos disponibles en la estructura de la solución (Navarrete, 2012; Hardie y Eugster, 1970). La abundancia de los compuestos en la solución determinará salmueras alcalinas, salmueras ricas en  $\text{SO}_4$  y Salmueras ricas en Ca (Figura 5).



**Figura 5.** Evolución de una salmuera a partir de una salmuera primitiva. Sulfato alcalino (I-IIA-III); Sulfato neutro (II-III) y calcio (II-IV). La línea discontinua muestra una trayectoria raramente observada desde la división de sales con contenido en Magnesio hasta el grupo de salmueras ricas en sulfatos ( $\text{SO}_4$ ) Risacher *et al.* (2004) en Hardie y Eugster (1970).

#### **3.1.4. Evaporitas**

El termino evaporita es ampliamente aceptada como “Una sal originalmente precipitada desde una superficie saturada o cerca de la superficie de una salmuera impulsada por la evaporación solar” ([Warren, 2016](#)). Así también, son consideradas como sedimentos químicos precipitados a partir de las salmueras, cuya diferencia principal con los sedimentos terrígenos clásticos es la fuente de formación. Se originan dentro del propio ambiente deposicional por precipitación fisicoquímica ([Alonso, 2006](#)).

Por otro lado, diversos precipitados minerales (Tabla 2) se acumulan alrededor de la salmuera residual producto de la evaporación, la cual ha alcanzado un estado de sobresaturación con respecto a una sal o sales minerales particulares.

**Tabla 2.** Principales minerales evaporíticos en las salmueras (Jones y Deocampo, 2004).

Grupo Mineral	Nombre	Fórmula Química
<b>Carbonatos</b>	Calcita	$\text{CaCO}_3$
	Aragonito	$\text{CaCO}_3$
	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Huntita	$\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$
	Magnesita	$\text{MgCO}_3$
	Hidromagnesita	$4(\text{MgCO}_3) \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
	Nesquehonita	$\text{MgCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Pirssonita	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{NaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Gaylussita	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{NaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
	Trona	$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Termonatrita	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	Nahcolita	$\text{NaHCO}_3$
	Natron	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
<b>Sulfatos</b>	Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Anhidrita	$\text{CaSO}_4$
	Mirabilita	$\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	Tenardita	$\text{Na}_2\text{SO}_4$
	Epsomita	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
	Hexahidrita	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Starkeyita	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
	Kieserita	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	Bloedita	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
	Glauberita	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$
	Kainita	$\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Schoenita	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Leonita	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
	Polyhalita	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Burkeita	$\text{Na}_6(\text{SO}_4)_2\text{CO}_3$
<b>Cloruros</b>	Halita	$\text{NaCl}$
	Hidrohalita	$\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Silvita	$\text{KCl}$
	Antarcticita	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Bischofita	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Tachyhidrita	$\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
	Carnalita	$\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

### 3.1.5. Zonación mineral

Los salares pueden presentar una zonación mineral definida. Su identificación se realiza mediante el reconocimiento y descripción de los minerales evaporíticos, los que se denominan facies o “Evapofacies minerales” (Vinante y Alonso 2006), las cuales pueden distribuirse en el salar vertical y/o lateralmente (Vila, 1975) (Figura 7).

La distribución de minerales en los salares está principalmente ligada a la alta tasa de evaporación, sin embargo, la distribución y precipitación de las evaporitas está condicionada por la permeabilidad, fracturas y diaclasas de la roca hospedante (Vega et al, 1997). Así también las posibles variaciones al modelo de evapofacies está dada por el clima, la composición y origen de las aguas subterráneas y la litología circundante. Ello también determinará la cantidad, tipo y zonación de las evaporitas en los salares (Kendall, 1992; Alonso, 2006).

La circulación de aguas subterráneas en el interior de la cuenca condiciona la formación de un diseño concéntrico de salinidad creciente que da finalmente con un núcleo halítico en el centro de la cuenca conocido como “*bull eye*”. De esta forma el orden de zonación evaporítica (orden creciente de solubilidad) corresponde a: borde (carbonatos), intermedias (yeso) y solubles (halitas) en el centro (Chapman et al., 1989; Alonso, 2006).

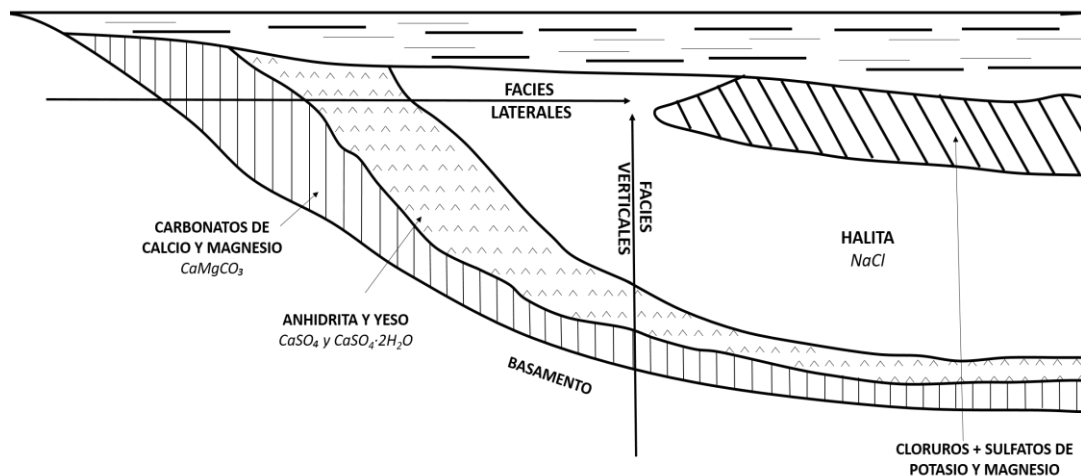
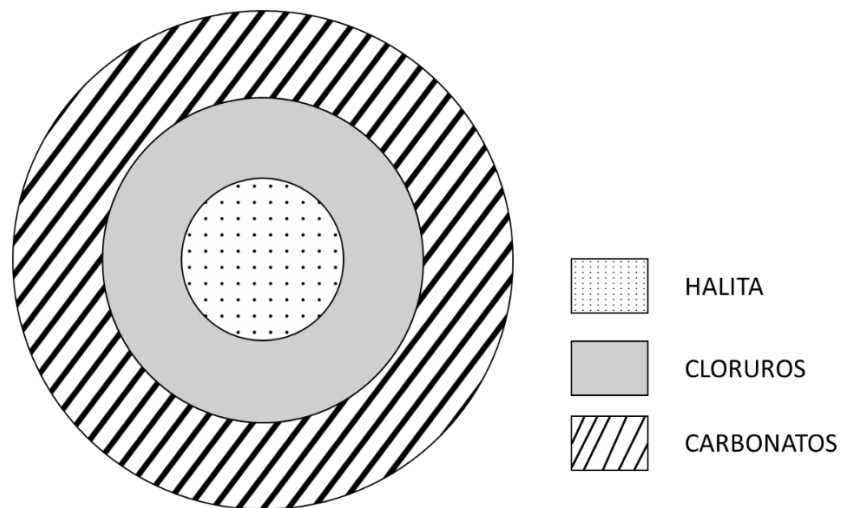


Figura 6. Esquema teórico de la zonación salina en los salares Richter-Bernburg 1972 y Vila, 1975.

La solubilidad de las diferentes salmueras depende de factores como la temperatura, presión y naturaleza del soluto y el solvente, en el salar solutos están representados por Carbonatos, Cloruros y Sulfatos (Vila, 1975).

Dado o anterior, es posible generar un modelo de facies evaporíticas o evapofacies a partir del grado o capacidad de solubilidad de los grupos minerales en relación con la distribución espacial dentro del salar. Este modelo de zonación mineral idealizado es concéntrico y está representado en vista en planta por una zona periférica el grupo menos soluble carbonatos, seguido del grupo de solubilidad intermedia sulfatos y una zona concéntrica atribuida a la zona de corteza Halítica (Figura 7). Pese a las distintas condiciones tectónicas, ambientales y geológicas este modelo idealizado concéntrico no siempre se cumple (Vila, 1975).



**Figura 7.** Modelo concéntrico ideal de zonación mineral de las costras salinas.

### **3.2. Sensores remotos y satélites**

Las imágenes satelitales han contribuido de gran manera al conocimiento de nuevos territorios, investigaciones en las ciencias de la tierra y la búsqueda de nuevos recursos naturales, es por ello, que diversos satélites se han puesto en órbita los últimos 40 años para continuar dichos objetivos. A continuación, se dará a conocer de manera breve los satélites (Landsat 7, 8 y ASTER) y sus características más relevantes.

#### **3.2.1. Sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper-Plus) de Landsat 7**

La gama de los satélites Landsat es impulsada desde sus comienzos por la NASA desde la década del 70, con el satélite Landsat-1, cuyo lanzamiento fue efectuado el 7 de marzo de 1972, este hecho da inicio a una nueva perspectiva del conocimiento de la tierra en términos de resolución tanto temporal como espectral desconocida hasta ese entonces ([Gonzaga, 2014](#)). El satélite Landsat 7 lanzado en abril de 1999, posee a bordo el sensor ETM+ cuyo sistema se utiliza en la aplicación hidrológica, agrícola, forestal, usos de los suelos, recursos costeros y monitorización medio ambiental.

Las primeras bandas de observación son las mismas bandas que su antecesor TM en Landsat 5, las que tienen una resolución de 20 metros y una nueva banda (banda pancromática) que posee una resolución de 15 metros y dos rangos de “ganancia” de 8 bits. ETM+ agrega una banda térmica (banda 6) de 60 metros de resolución, reemplazando a la banda de 120m puesta en el TM. Por lo tanto, los datos ETM+ cubren las bandas espectrales de onda corta e infrarrojo térmico (TIR), visible, e infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético (Tabla 3).

Tabla 3. Características principales del sensor ETM+ \*: Banda 6 se adquiere a una resolución de 60 metros, pero los productos se remuestrean a 20 metros por píxel. USGS. 2017

Sensor	Subsistema	Banda	Rango Espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolución (m)
Lansat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Visible	1	0.45-0.52	20
		2	0.52-0.60	
	VNIR	2	0.62-0.69	
		4	0.77-0.90	
	SWIR	5	1.55-1.75	
		7	2.09-2.25	
	TIR	6	10.4-12.5	60* (20)
	PAN	8	0.52 - 0.90	15

### 3.2.2. Sensor ASTER (Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer)

ASTER es un captor avanzado que transmite imágenes multiespectrales lanzado a bordo en el satélite TERRA de la NASA en diciembre de 1999, que dispone de cinco sensores a bordo: CERES, MISR, MODIS, MOPITT y ASTER. El objetivo principal de su lanzamiento fue mejorar la comprensión de los procesos de escala local y regional que ocurren en la superficie de la tierra, incluidas las interacciones entre la superficie y la atmosfera terrestre ([Yamaguchi et al., 1998](#)).

Cabe mencionar que TERRA es el primero de una serie de satélites multi-instrumentales que forman el sistema de observación de la tierra (EOS) de la NASA. Este satélite forma parte de un proyecto multinacional y multidisciplinario con la participación de las agencias espaciales de EE. UU., Canadá y Japón.

El sensor ASTER cubre una región espectral de 14 bandas las cuales abarca tres subsistemas desde el visible infrarrojo hasta el infrarrojo térmico, con características de alta resolución espacial, espectral y radiométrica ([Abrams et al., 2002](#)). Los tres subsistemas de ASTER corresponden a: el radiómetro visible infrarrojo cercano (VNIR) con 2 bandas de 15 metros de resolución espacial, el



subsistema (SWIR) con 6 bandas en la región espectral del infrarrojo de onda corta con 20 metros de resolución espacial, y el radiómetro infrarrojo térmico (TIR) con 5 bandas de 90 metros de resolución (Tabla 4).

**Tabla 4.** Características principales de sensor ASTER y subsistemas VNIR, SWIR y TIR. (USGS. 2017).

Sensor	Subsistema	Banda	Rango Espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)	Resolución Radiométrica (bits)
ASTER	VNIR	1	0.52-0.60	15	8
		2	0.62-0.69		
		2N	0.78-0.86		
		2B	0.78-0.86		
	SWIR	4	1.600-1.700	20	8
		5	2.145-2.185		
		6	2.185-2.225		
		7	2.225-2.285		
		8	2.295-2.265		
		9	2.260-2.420		
	TIR	10	8.125-8.475	90	12
		11	8.475-8.825		
		12	8.925-9.275		
		12	10.25-10.95		
		14	10.95-11.65		

### 3.2.3. Sensor OLI/TIRS de LANDSAT 8

El sensor OLI (*Operational Land Imager*) y TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) son instrumentos que se encuentran a bordo del satélite LANDSAT 8, lanzado en órbita en febrero del año 2014, enmarcados en la octava versión “*Landsat data Continuity Mission*” (LCDM), cuyos tres objetivos principales son: recopilar y archivar datos de cada superficie de la tierra , asegurar que los datos de LCDM sean consistentes con los datos obtenidos de los anteriores sensores y distribuir

los datos de manera estándar sobre una base no discriminatoria y de forma gratuita (Ariza, 2014).

Las bandas espectrales de los sensores OLI y TIRS mejoran a los instrumentos anteriores ETM y ETM+ de Landsat 5 y 7 respectivamente, con la incorporación de dos nuevas bandas: Dos bandas térmicas TIRS con resolución mínima de 100 metros con opción de remuestreo a 40 metros cuya utilidad es proporcionar temperaturas más precisas de la superficie, también se incorpora a este sensor un canal visible azul profundo (banda 1) específicamente diseñado para la investigación de zonas costeras y la búsqueda de recursos hídrico y finalmente, un nuevo canal infrarrojo (banda 9 ) con 40 metros de resolución que permite detectar nubes cirrus (Tabla 5).

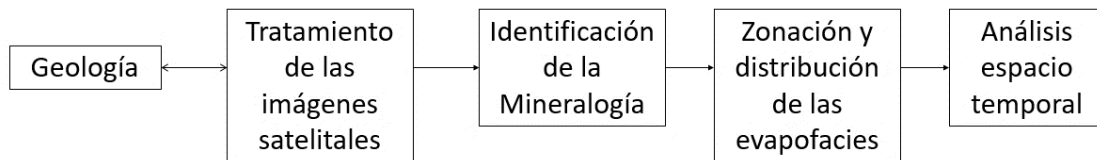
**Tabla 5.** Características principales del sensor OLI y TIRS \* las bandas TIRS se adquieren a una resolución de 100m por pixel, pero se vuelven a remuestrear a 40 metros, recuperado de Ariza, 2014. (USGS 2017).

<b>Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS)</b>	<b>Banda</b>	<b>Rango espectral (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Resolución (m)</b>
	Banda 1 - Aerosol Costero	0.42 - 0.45	20
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	20
	Banda 2 - Verde	0.52 - 0.59	20
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	20
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	20
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	20
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	20
	Banda 8 - Pancromatrico	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.26 - 1.28	20
	*Banda 10 - Infrarrojo Térmico (TIRS) 1	10.60 - 11-19	100
	*Banda 11 - Infrarrojo Térmico (TIRS) 2	11.50 - 12-51	100

#### 4. Metodología de trabajo

Para llevar a cabo el análisis espacio temporal de los ensambles minerales, fue necesario proponer una metodología el cual tiene como base y fundamental la

geología, el tratamiento y corrección de las imágenes multiespectrales, identificación de la mineralogía a partir de ROIs y/o Análisis de Difracción de Rayos X (DRX), determinar la distribución mineral en el salar y finalmente el seguimiento en un espacio y tiempo definido (Figura 8).



**Figura 8.** Metodología para el análisis espacio temporal a partir de sensores remotos.

Posteriormente se da inicio a la etapa de pre terreno, terreno y post terreno para el desarrollo de la metodología planteada.

### **Etapa de pre terreno**

- ✓ Recopilación y revisión bibliográfica de la zona de estudio. En particular información geológica de los salares e información de análisis espectral aplicado a los depósitos salinos o similares.
- ✓ Registro de datos hidrológicos; estaciones.
- ✓ Recopilación de imágenes satelitales que sirvan de apoyo para el trabajo de pre terreno, terreno y posterior análisis en la etapa de gabinete. Se utilizarán imágenes Google Earth a escala 1:50.000, imágenes multiespectrales Landsat 8 sensor OLI.
- ✓ Análisis Espectral: Consiste en corregir y procesar las imágenes satelitales para posterior aplicación de la combinación de bandas, cuyo resultado permitirá definir la posible distribución de la mineralogía en el salar.
- ✓ Confeccionar un mapa preliminar de zonación mineral a partir del procesamiento de las imágenes espectrales.
- ✓ Análisis tono y texturas: A partir de texturas, colores y lineamientos visibles en Google Earth se realizará un mapa preliminar geológico 1:50.000 el cual servirá de ayuda para el mapeo y chequeo de unidades en terreno.

## **Etapas de terreno**

Realizado en enero del 2018 se llevó a cabo:

- ✓ Muestreo de costra salina: se llevará a cabo un plan de muestreo en zonas de interés definidas por la combinación de bandas en imágenes satelitales y a partir de firmas espectrales en regiones de interés (ROIs).
- ✓ Reconocimiento Geológico de unidades litológicas, estructuras y contactos previamente definidos en la etapa pre terreno a partir de un mapa preliminar geológico 1:50.000.

## **Etapas Post Terreno**

- ✓ Validación y correlación de imágenes satelitales.
- ✓ Análisis de secciones transparentes de rocas previamente definidas.
- ✓ Análisis de resultados de difracción de Rayos X (DRX).

### **4.1. Procesamiento de imágenes satelitales LANDSAT**

La captura de imágenes satelitales a través de los sensores remotos está sujeta a una serie de interferencias y/o fallas naturales, lo que implica que la información substancial tenga errores que pueden ser corregidos a través de softwares especializados. Existen 4 casos:

- ✓ Caso 1: Errores comunes generados por fallas en los sensores implicando la producción de píxeles incorrectos en la imagen, lo que se corrige a través de la calibración radiométrica.
- ✓ Caso 2: El sensor puede generar errores producto de movimientos inesperados al momento que captura la imagen, dando como resultado distorsiones en la imagen global, cuyo problema puede ser modificado a través de la corrección geométrica.

- ✓ Caso 4: La interferencia atmosférica también es un factor preponderante en la generación de errores en la imagen, el efecto generado por los aerosoles altera de forma sistemática los valores adimensionales de los píxeles, lo que finalmente es modificado por una corrección atmosférica.

La metodología y procedimiento de la calibración de radiancia, corrección geométrica y corrección atmosférica utilizada en este trabajo corresponde al descrito por [Silva et al. \(2016\)](#), aplicada a una imagen satelital capturada por el sensor LANDSAT 8 OLI/TIRS.

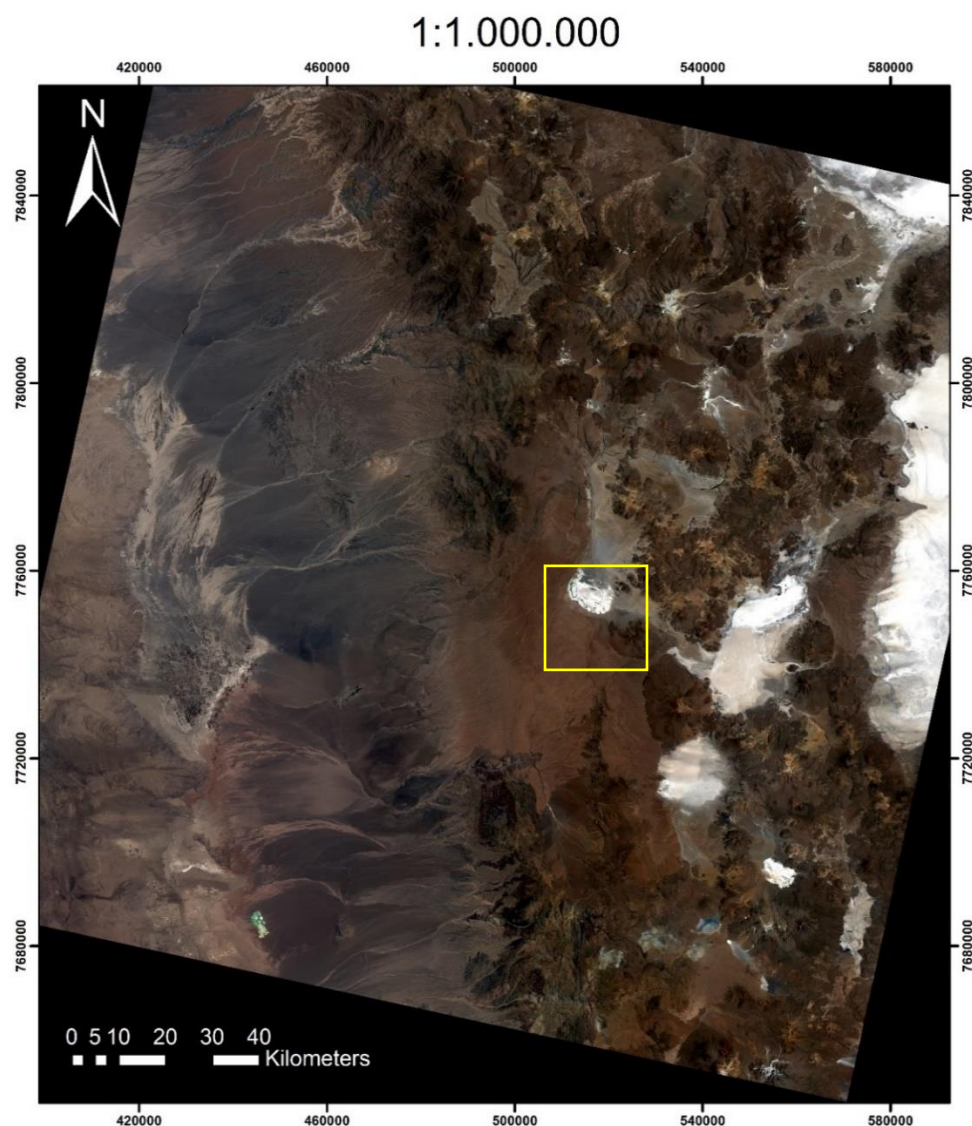
Dicha metodología sirve para corrección de imágenes de los sensores remotos asociados a Landsat: TM, ETM+ y OLI/TIRS.

#### **4.1.1. Calibración radiométrica**

La imagen natural (Figura 9) fue adquirida gratuitamente en la página del servicio geológico de Estados Unidos (USGS), captada por el sensor OLI de LANDSAT 8, con fecha 8 de diciembre del año 2017 a las 14:46:42 (UTC-4), cuyas características principales (metadatos) se encuentran en la Tabla 6. Esta información (llamada también archivos de cabecera) de extensión MTL es requerida por el software ENVI 5.4 para determinar y configurar el modelo atmosférico. Elementos como datos de vuelo del sensor, hora de la captura de la imagen, tipo de sensor, altitud del sensor y coordenadas pueden ser recopilados de dicho archivo. No obstante, la elevación promedio del suelo fue consultado a partir del procesamiento y generación de un DEM trabajado en *Global Mapper* versión 18 y en ArcMap versión 10.2.2, obteniéndose una elevación promedio en el salar del Huasco de 4.974m.

**Tabla 6.** Metadatos de la imagen satelital Landsat 8 adquirida archivo MTL. 10 de diciembre 2017.

Latitud	20°18'15,12''	Tipo de Sensor	Landsat-8 OLI	Datos de Vuelo	Dic-10-2017
Longitud	68°49'2,29''				
		Altitud Sensor (km)	705.000	Hora Vuelo GMT	14:26:24
		Elevación suelo (km)	2.974		
		Tamaño píxel (m)	20.0		



**Figura 9.** Imagen satelital (LC08\_L1TP\_001074\_20171210\_20171224\_01\_T1) sin procesar del área del Salar del Huasco, 1:1.000.000, USGS. Datos de la imagen: Satélite LANDSAT 8, sensor OLI, 2017-12-08, 14:46:46 (UTC-4).

Previa a la calibración atmosférica de las imágenes satelitales en el módulo *Fast Line of Sight Atmospheric Analysis Spectral Hypercubes* (FLAASH), es necesario ajustar los valores digitales a la radianza espectral en la banda intercalada por línea (Formato BIL) en el software ENVI 5.4 con la herramienta *toolbox* “*Radiometric Calibration*”, lo que da como resultado (Tabla 7) una imagen calibrada a radiancia en unidades de Vatios, estereorradián y micrómetros ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ) (Silva et al., 2016).

Tabla 7. Valores de calibración radiométrica de Imagen LANSAT 8 OLI/TIRS.

Bandas	Min	Max.	Promedio	Des. Est..
Band 1	9.945.614	42.151.058	8.985.972	3.230.774
Band 2	3.286.877	45.122.299	9.282.251	3.618.751
Band 3	2.345.903	43.441.189	9.830.609	3.628.092
Band 4	1.089.044	39.491.058	10.906.799	3.252.465
Band 5	10.307.749	25.475.922	8.234.808	2.138.050
Band 6	0	5.603.651	2.341.261	10.607.093
Band 7	0	1.695.357	10.707.381	10.188.138

#### 4.1.2. Corrección atmosférica Módulo FLAASH de ENVI 5.4

Posterior a la calibración radiométría el tratamiento de las imágenes satelitales habitualmente requieren de la aplicación de alguna corrección atmosférica, cuyo propósito es eliminar el efecto generado por los aerosoles y la radiancia intrínseca que se produce en el captor satelital, y se ve reflejado como producto de la interacción del captor con la atmosfera (Aguilar et al., 2016), dando como resultado a este proceso una imagen visualmente mejorada.

El modelo atmosférico, mencionado anteriormente, es una configuración que requiere ENVI 5.4 en la corrección atmosférica para procesar la imagen satelital según sus condiciones y características climáticas inherentes del lugar de la captura.

La tabla 8, define 6 distintos tipos de modelos atmosféricos para 6 meses del año, estos se varían esencialmente según sus características latitudinales, por ende,

sus condiciones atmosféricas locales. En el caso del salar del Huasco (Tabla 9), el punto medio del salar se encuentra en los 20°18'40" por lo que se le asigna el modelo atmosférico tropical (T), cuyos parámetros de vapor de agua y temperatura de superficie son de 4,11 (g/cm<sup>2</sup>) y 27°C respectivamente. Así también la fecha de la captura de la imagen es intrascendente, ya que en esas latitudes las variables atmosféricas son constantes (Tropical).

**Tabla 8.** Modelos de corrección atmosférica y constantes de los parámetros de vapor de agua y temperatura de aire-superficie, recuperado de (Silva et al.,2016). *Exelis Visual Information Solutions*, 2009.

Modelo Atmosférico	Vapor de Agua (std atm-cm)	Vapor de Agua (g/cm <sup>2</sup> )	Temperatura aire- superficie
Sub-Arctic Winter (SAW)	518	0,42	- 16°C (3°F)
Mid-Latitude Winter (MLW)	1060	0,85	- 1°C (30°F)
U.S. Standard (US)	1762	1,42	15°C (59°F)
Sub-Arctic Summer (SAS)	2589	2,08	14°C (57°F)
Mid-Latitude Summer (MLW)	3636	2,92	21°C (70°F)
Tropical (T)	5119	4,11	27°C (80°F)

Latitud (°N)	Enero	Marzo	Mayo	Julio	Septiembre	Noviembre
80	SAW	SAW	SAW	MLW	MLW	SAW
70	SAW	SAW	MLW	MLW	MLW	SAW
60	MLW	MLW	MLW	SAS	SAS	MLW
50	MLW	MLW	SAS	SAS	SAS	SAS
40	SAS	SAS	SAS	MLS	MLS	SAS
30	MLS	MLS	MLS	T	T	MLS
20	T	T	T	T	T	T
10	T	T	T	T	T	T
0	T	T	T	T	T	T
-10	T	T	T	T	T	T
-20	T	T	T	MLS	MLS	T
-30	MLS	MLS	MLS	MLS	MLS	MLS
-40	SAS	SAS	SAS	SAS	SAS	SAS
-50	SAS	SAS	SAS	MLW	MLW	MLW
-60	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
-70	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
-80	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW



**Tabla 9.** Valores aplicados para la calibración de módulo FLAASH, Salar del Huasco.

Modelo Atmosférico	Modelo de aerosol	Recuperación Aerosol	Visibilidad inicial (km)
Tropical	Rural	2-band (K-T)	40.00

Finalmente, los valores de cada banda deben ser normalizados en valores reales entre 0 y 1, para obtener dicho resultado es necesario utilizar la herramienta *Band Math* de ENVI 5.4 y ajustar la imagen con la ecuación 5.1 (Silva *et al.*,2016).

Dichos valores son ingresados en el software ENVI 5.4 para considerar los valores positivos de las bandas, en esta instancia la ecuación ordena a no considerar los valores de la banda 1 negativos (Le) anulándolos al multiplicarlos por 0, luego los valores mayores o iguales a 10.000 multiplicará por un 1, para considerarlos (Ge). Finalmente, se sumarán los valores de la fracción, los cuales serán positivos.

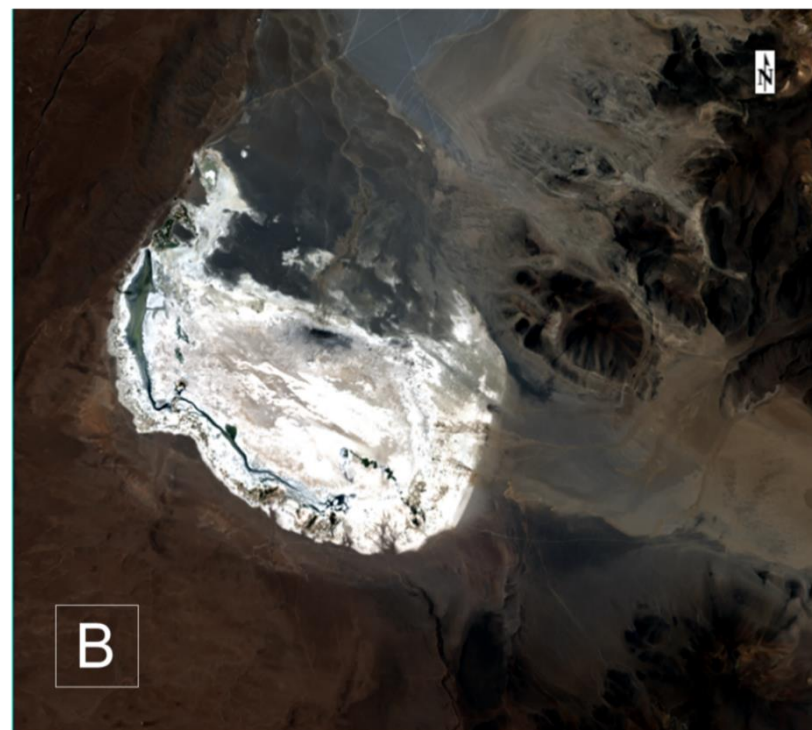
$$(B1 \text{ Le } 0) * 0 + (B1 \text{ Ge } 10000) * 1 + \frac{(B1 \text{ Gt } 0 \text{ and } B1 \text{ Lt } 10.000) * \text{Float}(B1)}{10.000} \quad (5.1)$$

Donde:

**B1:** Banda 1, **Le:** Menor que o igual, **Ge:** Mayor que o igual, **Gt:** Mayor que

**Lt:** Menor que

El resultado de la corrección atmosférica y la aplicación de la matemática de bandas dará como resultado en primera instancia, valores positivos en las 7 bandas espectrales. y en segunda instancia, el resultado y calidad visual de la imagen en términos de nitidez aumenta notoriamente (Figura 10a y 10b).



**Figura 10.** Comparación de imagen satelital natural y e imagen satelital con calibración modulo FLAASH (reflectancia normalizada). a: Imagen natural b: Imagen procesada y corregida con modulo atmosférico FLAASH. Datos de la imagen: Satélite LANDSAT 8, sensor OLI, 2017-12-08, 14:46:46 (UTC-4).

#### 4.1.3. Transformación *Minimum Noise Fraction* (MNF)

El MNF es un análisis de componentes principales (PCA) que se utiliza para detectar y seleccionar aquellos elementos de las bandas que generan ruido. El objetivo de utilizar esta transformación es segregarse el ruido de los datos y reducir los requerimientos de hardware inherentes al proceso (Green et al., 1988; Boardman y Kruse, 1995), reduciendo los requisitos computacionales para el procesamiento posterior de la imagen (Kruse, 1996).

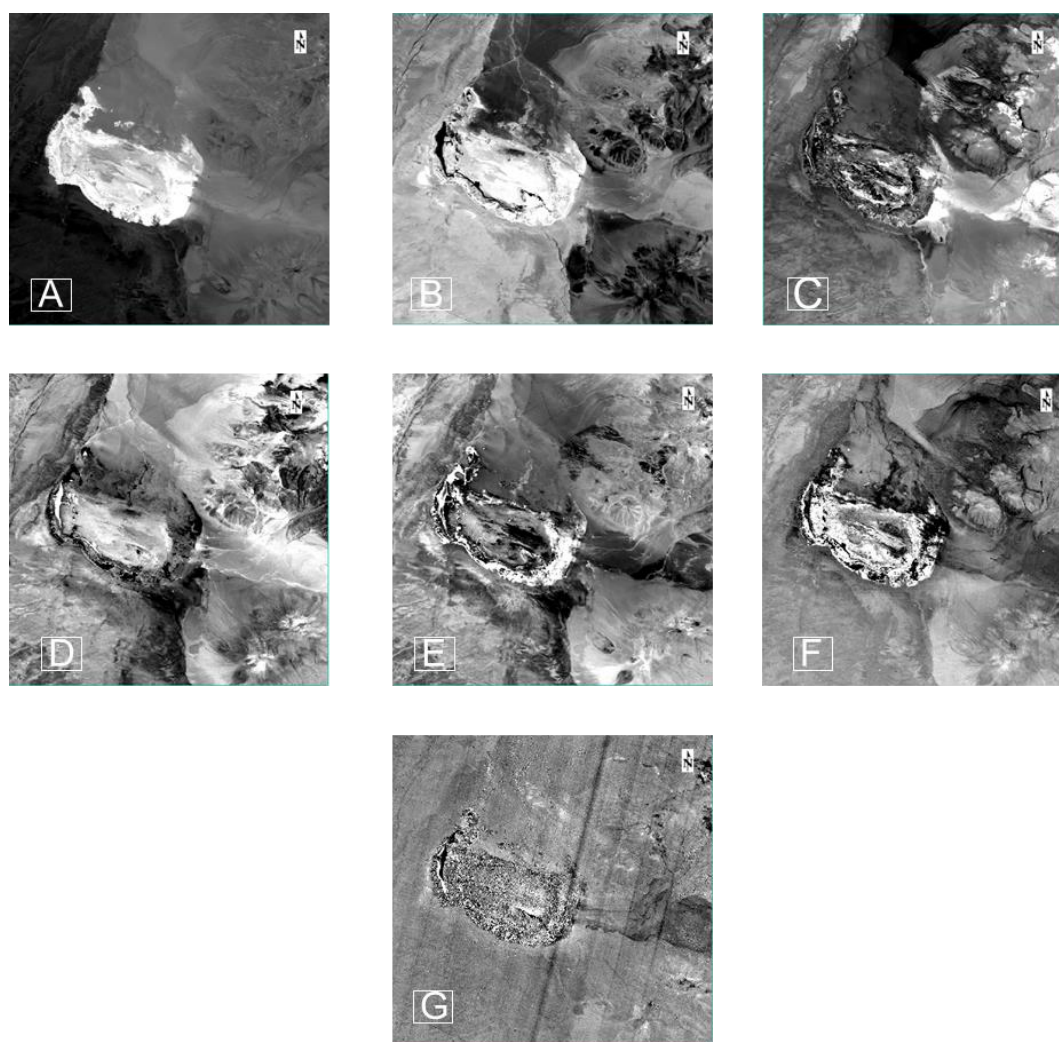
El proceso consiste en utilizar dos transformaciones en cascada (Pérez et al., 2010), en base a los PCA. La primera transformación ejecuta la acción de remover y reescalar la correlación entre la banda y el ruido, la segunda corresponde al análisis de componentes principales derivada de los datos de la imagen original, luego de haber sido corregida en la primera transformación y redimensionado por la desviación estándar del ruido.

La aplicación del MNF sobre la imagen original en software ENVI 5.4, da cuenta de los valores o coeficientes adimensionales que aporta cada banda (Tabla 10), esta última corresponde a una imagen en escala de grises, descompuesta en 7 sub imágenes (Figura 20 A-G) de las que representa a todas las bandas del sensor OLI.

La aplicación de esta metodología da como resultado la detección de una sola banda que genera ruido, la banda 7. En ella se visualiza líneas oblicuas en la zona centro, centro izquierdo de la imagen, y distorsión dentro del salar (Figura 11G).

**Tabla 10.** Resultados valores de la imagen satelital con MNF.

Bandas	Min	Max.	Promedio	Des. Est.
	-			
Band 1	121.708.275	29.729.736	0.000000	13.471.179
Band 2	-36.918.930	57.188.499	0.000000	8.770.980
Band 3	-36.519.455	68.237.175	0.000000	7.616.443
Band 4	-37.693.199	52.620.899	0.000000	4.896.126
Band 5	-93.390.945	120.674.690	0.000000	4.190.650
Band 6	-57.451.859	138.730.377	0.000000	3.428.417
Band 7	-0.003132	0.003077	0.000000	0.000236



**Figura 11.** Imagen satelital del salar del Huasco separadas por banda, Análisis MNF: A: Banda 1: B: Banda 2, C: Banda 4, D: Banda 4, E: Banda 5, F: Banda 6, G: Banda 7. Se puede apreciar en la banda 7 líneas oblicuas y distorsión en el centro asociado al ruido en el momento de la captura. LANDAT 8 OLI, 2017-12-10, 14:46:24 (UTC-4).

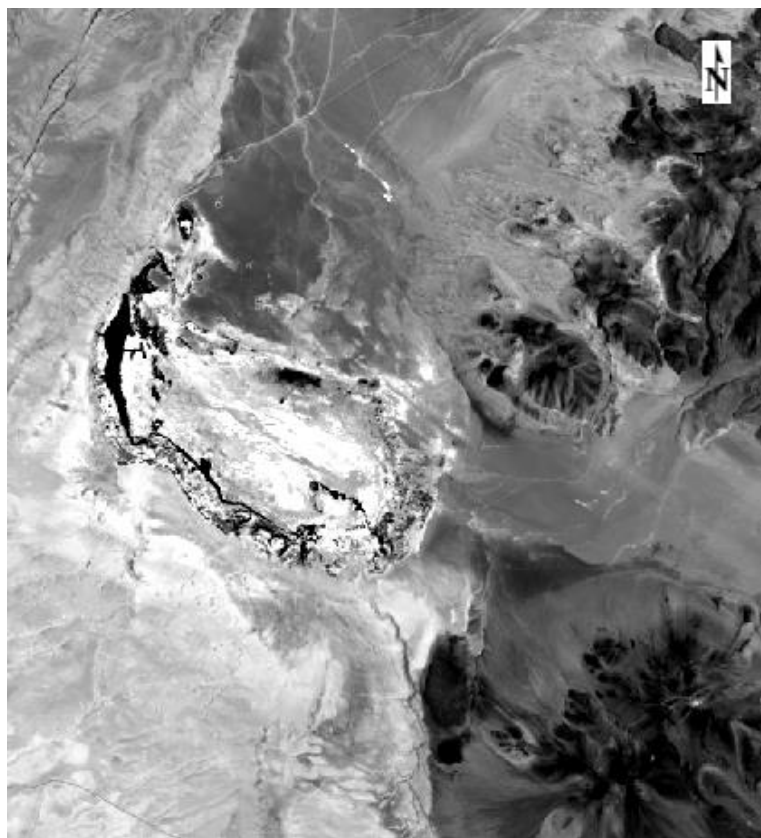
#### 4.1.4. Transformación Minimum Noise Fraction Inverse (MNF Inverso)

Para contrarrestar los efectos del ruido que genera la Banda 7 a la imagen, se llevó a cabo la aplicación de la inversa MNF (Figura 12), que consiste en suavizar y corregir la banda problema (Banda 7) a partir de la aplicación de la herramienta de ENVI 5.4 “*Inverse MNF rotation*” y utilizando el archivo MNF generado anteriormente.

El procesamiento consiste en trabajar con la misma imagen MNF con reflectancia normalizada, donde se seleccionan las bandas que no tienen problemas (las 6 primeras bandas positivas), en este punto el software considera la banda que no fue seleccionada, identificándola como banda problema, por lo que procede a suavizarla. Con este procedimiento los valores de las 7 bandas quedan normalizados en valores positivos como se muestra en la tabla 11, mejorando los resultados estadísticos para realizar análisis espectrales posteriores.

**Tabla 11.** Comparación de las estadísticas de las bandas de la imagen antes y después de la aplicación del MNF inverso.

<b>Bandas</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b>Promedio</b>	<b>Des. Est.</b>
Band 1	0.000051	0.911281	0.119672	0.072655
Band 2	0.002064	0.883014	0.125443	0.072347
Band 3	0.006670	0.912433	0.175422	0.077422
Band 4	0.007208	0.939453	0.240184	0.078018
Band 5	0.003500	0.941696	0.295184	0.079164
Band 6	0.000006	0.817297	0.339758	0.088452
Band 7	0.000508	0.730751	0.303403	0.0880814



**Figura 12.** Imagen satelital MNF invertida con banda 7 corregida con MNF inverso. LANDAT 8 OLI, 2017-12-10, 14:46:24 (UTC-4).

#### 4.1.5. Construcción de Máscara a partir de Matemática de bandas

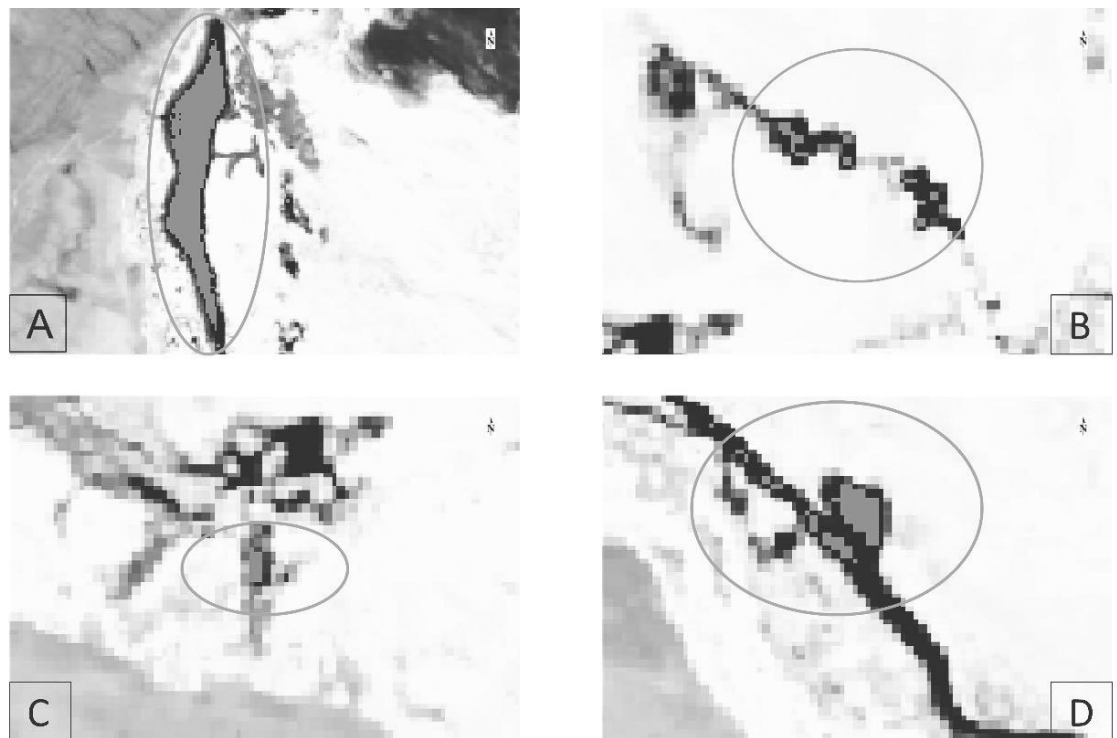
En el supuesto caso en que los valores de las bandas aun dieran valores negativos es necesario la construcción de una máscara en ENVI 5.4 la que tiene como función descartar zonas que puedan presentar valores adimensionales altos de reflectancia en los píxeles de la imagen, lo que implica que el software pueda considerarlo como ruido. Para hallar estos valores de píxeles, es necesario aplicar la herramienta matemática de Bandas “*Band Math*”, donde se ingresó la ecuación 5.2, la cual selecciona los valores negativos por cada banda creando una especie de mosaico espacial que al sumarlos genera una superposición de todos los píxeles seleccionados en una imagen formato Raster, la que finalmente es convertida a formato *Shape*.

$$(B1 Le 0) + (B2 Le 0) + (B4 Le 0) + (B4 Le 0) + (B5 Le 0) + (B6 Le 0) + (B7 Le 0) \quad (5.2)$$

Donde:

B1: Banda 1, B2: Banda 2, B2: Banda2, Banda 4, B5: Banda 5, B6: Banda 6, B7: Banda 7, Le: menor a.

Las áreas que presentaron valores altos de reflectancias donde se aplicó la máscara corresponden a zonas húmedas, zonas de manantiales al oeste del salar (Huasco Norte, Las Ruinas y el Ermitaño) (Figura 13a) y zonas oscuras cuya razón posible es la rugosidad de la superficie del salar en donde se genera sombra y zonas de vegetación Halófila (Figura 13 b-d).



**Figura 13.** Construcción y aplicación de máscara a zonas de alta reflectancia delimitados en gris. Imagen en escala de grises. A: Sector oeste del salar y principales Manantiales: Huasco Norte, Las Ruinas y el Ermitaño. B, C y D: zonas de afloramientos de agua.



## 4.2. Análisis de firma espectral

El análisis de imágenes espectrales mediante la firma espectral corresponde a la interacción de la energía electromagnética con los distintos materiales dispuestos en la superficie. Análisis que se basa en función del porcentaje de reflectancia y las respectivas longitudes de ondas de cada material en unidades de micrómetros ( $\mu\text{m}$ ).

Los valores que entregan los materiales dependen de las características fisicoquímicas de los objetos que interaccionan con la energía electromagnética, y que corresponden a minerales evaporíticos formados en los salares ([Jones y Deocampo, 2004](#)) (ver Tabla 2), estos elementos presentan diversas firmas espectrales según su composición química, contenido de agua y otros elementos esenciales como el grupo OH.

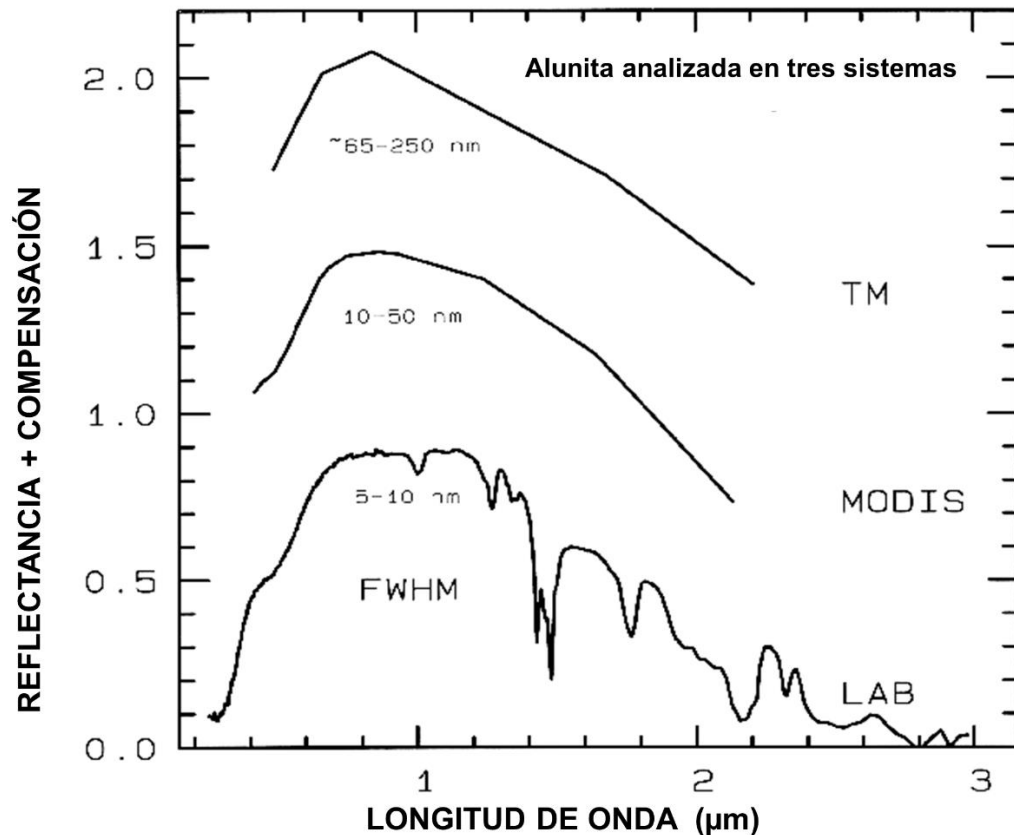
La metodología para llevar a cabo el análisis de la firma espectral comienza con estudio y cálculo de reflectancia de los materiales en el laboratorio, donde se obtienen valores de absorción con longitudes de onda más precisas. Cabe señalar que dichos detalles se reducen a medida que es analizado en otros sistemas de menor resolución como los sensores remotos comparados con los espectros definidos en laboratorio ([Clark, 1999](#)).

El análisis de firma espectral en sensores remotos posee gráficamente menos resolución en comparación a los datos obtenidos directamente del laboratorio, por lo que es usual ver diversos gráficos en donde comparan la firma espectral a partir de imágenes satelitales y librerías espectrales disponibles en la USGS

El ejemplo de la Alunita en la (Figura 14), muestra el porcentaje (%) de reflectancias que entrega el mineral versus la longitud de onda analizado en 4 sistemas:

- ✓ Análisis de laboratorio
- ✓ Sensor *moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS)
- ✓ Sensor *Thematic Mapper* (TM) de LANDSAT





**Figura 14.** Comparación de espectros de mineral Alunita con sensor Landsat 5 Sensor TM, MODIS y análisis de laboratorio, [Clark, 1999](#).

### 4.3. Análisis de difracción de rayos X (DRX)

Para determinar la mineralogía de las muestras de terreno se realizó el análisis de difracción de rayos X, cuyo tratamiento de muestras fue llevado a cabo por el departamento de laboratorios del servicio nacional de geología y minería.

El procedimiento realizado para la preparación consistió en secar las muestras a temperaturas bajas, para posterior cuarteo y molienda controlada, esta última realizada debido a las características higroscópicas de las muestras. El procedimiento de barrido se realizó en un difractómetro marca *Panalytical*, modelo *X Pert PRO* y el programa de interpretación *High Score Plus*, cuya lista de patrones, parámetros de *Scan* y difractogramas se encuentran en el ANEXO C.

#### 4.4. Análisis espacio temporal

El análisis espacio temporal de las evapofacies del salar del Huasco fue llevado a cabo a través de la descarga de imágenes satelitales LANDSAT8 OLI en el servidor que dispone gratuitamente la USGS. Se trabajaron y corrigieron y compararon 10 imágenes satelitales que corresponden a los meses de verano e invierno desde el año 2014 hasta el año 2017 (Tabla 12).

El criterio de búsqueda de las imágenes para este trabajo estuvo enfocado en la disponibilidad de imágenes tomadas durante el día y que en la captura tuvieran baja o nula nubosidad (<10%). Cabe mencionar que no hubo disponibilidad para imágenes correspondientes al mes de febrero del año 2014, por lo que se deduce que el satélite LANDSAT 8 no capturó imágenes en el área de estudio a pocos días de su lanzamiento (febrero 2014), decidiendo comenzar el análisis en marzo de dicho año.

**Tabla 12.** Datos y fechas de las imágenes satelitales utilizadas en este trabajo, satélite LANDSAT 8 OLI/TIRS, formato hora (UTC-4).

Nombre imagen	Fecha imagen	Hora de captura satélite	Cobertura nubes	Cobertura nubes de la escena
LC08_L1TP_001074_20130323_20170505_01_T1	23-03-2013	14:36:04	<10%	<10%
LC08_L1TP_001074_20130809_20170503_01_T1	09-08-2013	14:38:16	<10%	<10%
LC08_L1TP_001074_20140201_20170426_01_T1	01-02-2014	14:37:19	<10%	<10%
LC08_L1TP_001074_20140812_20170420_01_T1	12-08-2014	14:36:16	<10%	<10%
LC08_L1TP_001074_20150220_20170412_01_T1	20-02-2015	14:36:04	<10%	<10%
LC08_L1TP_001074_20150815_20170406_01_T1	15-08-2015	14:35:58	<10%	<10%
LC08_L1TP_001074_20160122_20180129_01_T1	22-01-2016	14:36:20	<10%	<10%
LC08_L1TP_001074_20160817_20180129_01_T1	17-08-2016	14:36:20	<10%	<10%
LC08_L1TP_001074_20170209_20170217_01_T1	09-02-2017	14:36:13	<10%	<10%
LC08_L1TP_001074_20170804_20170812_01_T1	04-08-2017	14:36:15	<10%	<10%

## 5. MARCO GEOLÓGICO

### 5.1. Evolución geotectónica

La evolución paleogeográfica del margen occidental de Gondwana, ha estado ligada a la acreción de terrenos desde el Mesoproterozoico, principalmente afectando al margen SW de Sudamérica (Sur del Perú, oeste de Bolivia, oeste de Argentina y el Norte de Chile) (Loewy et al, 2004; Ramos, 2008; Cawood y Buchan, 2007). En términos constructivos, la paleogeografía ha sido dividida en periodos de deformación y dinámica de placas, las cuales son asignados como ciclos en periodos definidos; Ciclo Pampeano, Ciclo Famatiniano, Ciclo Gondwánico, Ciclo Preandino y Ciclo Andino (Charrier et al, 2007).

Durante el Paleozoico la dinámica de placas estuvo caracterizada por la amalgamación de terrenos al margen occidental de Sudamérica, dando inicio al desplazamiento del arco hacia el este (Charrier et al, 2007).

El Ciclo Gondwánico (Devónico Superior – Pérmico Inferior). Es caracterizado por el desarrollo de un arco magmático, el cual varia su posición en el margen occidental, debido a las condiciones de subducción. En este ciclo son asignados depósitos volcánicos y plutónicos compuesto por sucesiones volcánicas dacíticas, riolíticas y subordinadamente andesíticas de espesores entre 1.000-4.000m, alternando con depósitos lacustres atribuibles a la Formación Collahuasi. Por otro lado, las unidades magmáticas son escasas, particularmente entre los 6-18° Latitud Sur. El magmatismo está asociado a firmas calco alcalinas, en este sentido las unidades intrusivas proximales a la zona de estudio corresponden al granito Chara y los intrusivos cuarzozoníticos (Pérmico Inferior) ubicados en el Salar del Huasco.

El ciclo Pre Andino (Pérmico superior tardío – Jurásico inferior temprano). se caracteriza por presentar nula a escasa subducción, se distingue por la actividad silícea abundante de amplia extensión. Cuencas extensionales de orientación NNE-SSW asociadas a las suturas de terrenos de los ciclos anteriores. El magmatismo no estuvo asociado a la formación de arcos volcánicos ni formación de un orógeno ([Charrier et al, 2007](#)), sin embargo, esta escasa subducción produjo un abombamiento litosférico lo que derivó en grandes volúmenes de magmas distintivos de un margen extensional. Nuevas edades asignadas a la formación Collahuasi son registradas por [Munizaga, et al \(2008\)](#) (Grupo Collahuasi), el cual acota al miembro superior a una edad Ladianiana – Carniana.

El Ciclo Andino es caracterizado por la reanudación de la subducción y por el desplazamiento del arco volcánico hacia el este. Debido a la diversidad de los procesos ha sido dividido en 4 etapas ([Charrier et al, 2007](#));

- ✓ Primera etapa (Jurásico inferior tardío – Cretácico inferior tardío): Se desarrolla un arco magmático de orientación N-S ubicado en la actual Cordillera de la Costa. En la zona de estudio las unidades atribuidas a esta etapa corresponden a la Formación Quehuira y Formación Cerro Empexa en el salar del Huasco y Coposa.
- ✓ Segunda Etapa (Cretácico inferior tardío – Eoceno medio): Se da inicio de la Fase Peruana, con el evento generalizado de deformación (Cretácico Inferior) y Termina Con la fase Incaica (Eoceno medio).
- ✓ Tercera Etapa (Eoceno): Comienza con la Fase Incaica donde la convergencia pasa de ser oblicua a normal, registrándose un cambio en la velocidad de subducción. Durante esta etapa se forma el relieve Incaico debido a la alta tasa de convergencia y se produce el alzamiento andino (Cordillera Incaica), donde finalmente se individualizaron las unidades morfo estructurales y relieve actual. Las unidades de la zona de estudio, en su mayoría corresponden al periodo Neógeno, atribuidas a la denudación del relieve Incaico y desarrollo del arco volcánico actual (Pleistoceno- Holoceno);

estrato volcanes del Mioceno, depósitos aterrazados, volcanes y centros eruptivos menores del Plioceno y Pleistoceno corresponden a las unidades más representativas proximales al salar del Huasco [Vergara y Thomas, \(1984\)](#).

## **5.2. Geología local**

## **5.3. Geología del salar del Huasco**

Las siguientes unidades descritas corresponden al trabajo de [Vergara y Thomas, \(1984\)](#) (Figura 15).

### **5.3.1. Rocas estratificadas**

#### **Formación Collahuasi (Carbonífero- Pérmico Inferior)**

Definida como un complejo integrado por intrusivos subvolcánicos, lavas e ignimbritas de composición riolítica y dacítica ([Vergara, 1978b](#)). Aflora en el sector sur central del área de estudio cercano al sector de Sierra del Medio, alcanzando un espesor total promedio de 4.200m. Según los distintos tipos litológicos predominantes de esta formación, la secuencia ha sido subdividida en tres miembros.

Miembro Inferior: Compuesto principalmente por rocas volcánicas de composición dacítica y riolítica, intercalado en menor proporción con lentes calcáreos y areníticos sin presencia de fósiles, estos últimos definidos como Estratos de Capella ([Vergara, 1978b](#)), los cuales afloran esporádicamente al ENE de la localidad de Collahuasi.

- ✓ Miembro Medio: Secuencia volcanosedimentaria compuesta por Lavas andesíticas y por areniscas en proporciones menores, conglomerados y tobas.

- ✓ Miembro Superior: Corresponden a rocas dacíticas, riolíticas, andesíticas (Quebrada Asnajuno y Cerro Guastipa) y rocas sedimentarias subordinadas.

### **Formación Quehuita (Jurásico Medio a Superior)**

Esta formación aflora en el sector suroccidental del área de estudio, corresponde a una secuencia sedimentaria de espesor aproximado de 2.700m que subyace en discordancia angular y erosión a la Formación Collahuasi. Compuesta principalmente por areniscas, lutitas y en menor proporción por calizas y depósitos evaporíticos de origen marino y continental ([Vergara, 1978b](#)). La Formación Quehuita en base a su diferencia litológica y de ambiente de formación ha sido subdividida en cuatro miembros, los que en dicho trabajo fueron descritos:

- ✓ Miembro inferior: Areniscas, lutitas, calcarenitas y calizas con estratificación bien definida, caracterizada como ambiente marino.
- ✓ Miembro Superior: Litológicamente más monótona corresponden a areniscas y lutitas pardo-rojizas con intercalaciones subordinadas de calizas en transición con miembro inferior. Caracterizada como ambiente continental.

### **Formación Cerro Empexa (Titoniano - Neocomiano)**

Su distribución espacial se limita al margen sur occidental del área de la hoja Collacagua, donde presenta espesores aproximados de 750m. Corresponde a una secuencia continental que se dispone en discordancia angular sobre la Formación Quehuita, compuesta por andesitas, traquitas, brechas, tobas y sedimentitas clásticas. Intruida por granitoides de edad Terciaria correlacionable con la Formación Altos de Pica ([Galli, 1957](#)). Ha sido subdividida en 2 miembros:

- ✓ Nivel basal de vitrófiros negros de escasa potencia con intercalaciones menores de cherts lenticulares bandeados (evidencia un ambiente lacustre).
- ✓ Nivel medio y superior de tobas riolíticas de color gris a rosado claro.

### **Ignimbrita Huasco (Mioceno Medio)**

Está compuesta principalmente por una secuencia de tobas soldadas ubicadas al oeste del salar Homónimo, en esencia, presenta tobas parcialmente soldadas, de composición riolítica y dacítica, tobas rosadas y en menor cantidad lentes de cherts bandeados.

Su distribución se extiende en su mayoría al norte del área de la Hoja Collacagua y al oeste y sur del salar del Huasco alcanzando 1.800 km<sup>2</sup>. Dicha unidad se dispone en discordancia sobre las unidades pre-Miocénicas en forma de loza casi continua, presentando variaciones de espesor lateral, haciéndose más delgada hacia los bordes.

### **Estratovolcanes I (Mioceno Superior-Plioceno)**

Unidad Informal, corresponde a los conos más antiguos y erosionados del área, presentando entre sus características más importantes, bajos niveles topográficos y presencia de alteración solfatárica. Su relación estratigráfica está dada por la cobertura de ignimbritas pleistocénicas (Ignimbrita pastillos) y por lavas de otros centros volcánicos. Los estratovolcanes más representativos corresponden a el Volcán Millunu, intensamente erosionado, compuesto por andesitas de piroxeno y hornblenda, y por flujos de lava de composición dacítica, que se intensifican en sector boliviano; y el Lava-domo de Yuma constituido principalmente por dacitas macroporfídicas.

### **Depósitos Aterrazados Tt (Mioceno Superior)**

Depósitos de gravas, arenas polimícticas poco consolidadas y a tobas de composición dacítica de variable espesor (20 a 400m). Se ubican en la depresión de Caya y en menor proporción en torno a la Quebrada de Huinquentipa (Estratos de Huinquentipa; Vergara, 1978b) y se extienden al oeste, hasta el margen oriental de la pampa del Tamarugal.

### **Estratovolcanes II (Plioceno)**

Unidad Informal, corresponde a la mayoría de los estratos volcanes del área que presentan alturas cercanas a los 1.000m sobre la superficie de los salares, se caracterizan por poseer conos relativamente bien preservados y cráteres moderadamente erosionados. Desde el punto de vista litológico están constituidos por andesitas y dacitas en proporciones equivalentes. Los volcanes más representativos corresponden a Puruma, Chutinza, Laguna, Vulcan, Napa, Huaila Occidente y Piga.

#### **5.3.1.1. Depósitos Aterrazados Tpt (Plioceno)**

sobreyace a la Ignimbrita Huasco, está conformada por relictos de terrazas en el sector suroccidental del Salar de Coposa, está dispuesta por una sucesión de gravas, arenas, limos, cenizas y tobas. Su espesor varía, aumentando progresivamente hacia el sector central de la cuenca del salar, alcanzando alturas hasta los 12m.

#### **5.3.1.2. Estratovolcanes III (Plioceno Superior- Pleistoceno)**

Unidad informal, corresponde a estratovolcanes que preservan su morfología debido a que no han sido erosionados o porque aun exhiben actividad solfatárica.



Está compuesto por el Volcán Pabellón del Inca (Andesitas), Puriñita e Irruputuncu (aun activo) (Andesitas y Dacitas) de piroxeno y hornblenda.

#### **5.3.1.3. Ignimbrita Pastillos (Pleistoceno Medio)**

Unidad de ignimbritas y depósitos cineríticos, expuesta en el cuadrángulo Ujina ([Vergara, 1978b](#)), la cual sobreyace a los depósitos Pliocénicos, como también a la mayoría de los centros volcánicos del área. Su distribución área se acota en gran parte de la depresión de los Salares, exhibiendo espesores que aumentan hacia el norte de hasta 55m.

Esta unidad ha sido subdividida en dos miembros principales, según su variación litológica. Miembro inferior: Constituido por tobas, aglomerados y depósitos de Lahar altamente poroso de colores que varían de gris claro a blanco. Miembro Superior: Corresponde mayoritariamente a un depósito de cineritas de composición dacítica no soldadas, en las cuencas del salar del Huasco y Coposa se incluyen niveles sedimentarios como arcillolitas, limos y diatomitas.

### **Depósitos no consolidados**

#### **Depósitos Salinos (Qs)**

Están representados por los salares del Huasco, Coposa y Michincha, cuyos constituyentes químicos son predominantemente sulfatos y en cantidades menores cloruros y boratos. Se caracterizan por exhibir eflorescencias salinas junto a gravas, limos y cenizas.

#### **Depósitos Aluviales (Qal)**

Depósitos detríticos no consolidados que se exhiben en quebradas, depresiones y depósitos de piedemonte; Gravas, arenas y arcillas.

### **Depósitos Cineríticos con Costras Salinas (Qsp)**

Se ubican en el sector occidental del Salar de Coposa y corresponden a una mezcla entre depósitos de cenizas (Ignimbrita Pastillos) y sales.

### **Depósitos Aluviales de Ceniza y Lapilli (Qipe)**

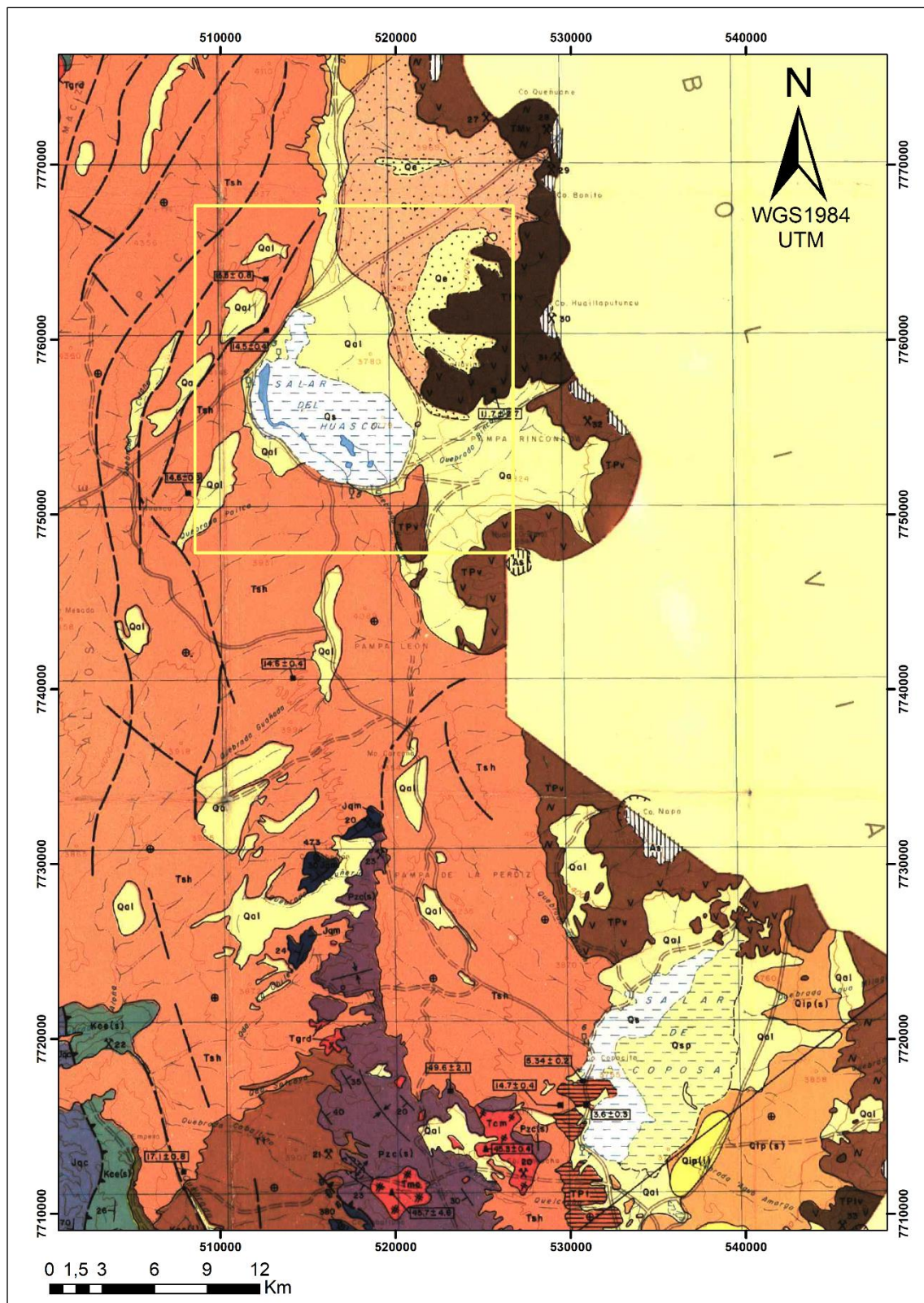
Extensos conos de deyección conformados por cenizas y lapilli redepositados, y en menor cantidad por clastos de andesitas y dacitas, estos depósitos están ubicados en los flancos orientales de algunos salares.

### **5.3.2. Rocas intrusivas**

**Unidad Granito Chara** (Pérmico Inferior): Stock que abarca una superficie de 60km<sup>2</sup>, el cual aflora en el sector oriental de la Sierra del Medio, al SSE del Morro Chara. Descriptivamente las rocas que la constituyen presentan color rosado claro a gris-blanquecino de textura equigranular gruesa a excepción en algunas zonas periféricas donde se presentan texturas porfídicas por la presencia de fenocristales de cuarzo, de hasta 5mm de diámetro. Una de las particularidades del granito Chara en la parte nororiental, corresponde a un sistema subparalelo de diques andesíticos que lo cortan espaciados a una distancia aproximada de 5-10m, dándole un aspecto a distancia de pseudoestratificación.

**Unidad Cuarzo Monzonita** (Paleógeno): Pequeño stock de cuarzo-monzonita con facies de granodioritas subordinadas, reconocidas en el Cerro Longacho situado al oeste del Salar de Coposa. Texturalmente presenta cristales equigranulares, de tamaño fino a medio, constituidos por plagioclasas alterada a epidota y sericita, ortoclasa, cuarzo, hornblenda y piroxeno.

**Unidad Monzodioritas Cuarcíferas** (Paleógeno): estas corresponden a un stock que aflora al norte del Cerro Guastipa y también al oeste del Cerro Yabricoya, la cual intruye a la Miembro Superior de la Formación Collahuasi, existiendo un débil metamorfismo de contacto.



**Figura 15.** Mapa geológico de salar del Huasco y Coposa 1: 250.000, área amarilla corresponde al área de estudio. Modificado de Vergara y Thomas, 1984.

## **5.4. Geomorfología**

### **5.4.1. Geomorfología regional**

Las Principales unidades Morfoestructurales del norte Chile (Figura 16), entre los 18° y 20° Latitud Sur son caracterizadas por presentar dominios topográficamente distintivos, entre ellos: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera, Depresión de los Salares, Cordillera Occidental y el Altiplano. La zona de este estudio se sitúa en la unidad morfoestructural de la Depresión de los Salares, ubicada entre la Precordillera y la Cordillera Occidental.

#### **4.4.1.1 Cordillera de La Costa**

Cadenas Montañosas entre 1.000–2.000m de altura, con escarpes debido a procesos de erosión marina ([Charrier, 2007](#)). Esta unidad morfoestructural se extiende por más de 4.000m a lo largo del margen chileno entre la región de Arica y Parinacota y la región de Antofagasta ([Gallardo, 2015](#)).

#### **4.4.1.2 Depresión Central**

La topografía de la depresión central se caracteriza por sus bajos topográficos correspondiente a un plano de sedimentación regional Mioceno, y está definida como una cuenca endorreica rellena por depósitos sedimentarios e ignimbríticos, denominada como Pediplano de Tarapacá ([Farías et al., 2005](#)).

#### **5.4.1.1. Precordillera Antearco (Cordillera de Domeyko)**

Las características que describen a esta unidad son atribuidas a su gran extensión, altos topográficos y por poseer a una meseta alargada. Esta última presenta un ancho que varía entre los 20 y 45km con una altitud promedio que aumenta de este a oeste entre los 2.400–4.800m ([García et al, 2004](#)). Típicamente presentan estructuras de tipo contraccional asociado a pliegues y

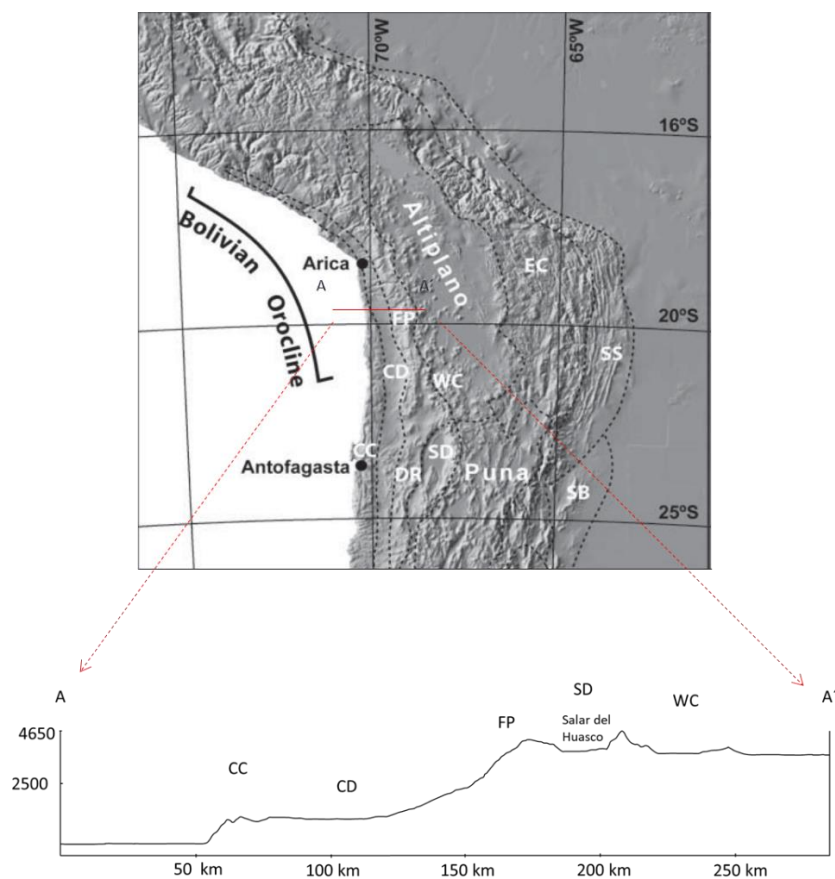
flexuras que inciden en la topografía local y en la Depresión Central (García et al. 2011). El desarrollo de estas estructuras ha permitido la acumulación de sedimentos sintectónicos sobre un amplio paleo relieve conocido como Pediplano de Choja durante el Eoceno Superior- Oligoceno Inferior (Galli, 1967; Farías et al, 2005; Taucare, 2015).

#### **5.4.1.2. Depresión de los Salares**

Esta unidad morfoestructural, corresponde a depresiones definidas como intramontanas (García, 2004), ubicadas entre 4.700 y 4.200m s.n.m. Alojan cuencas endorreicas que incluyen a los Salares Del Huasco, Coposa en la región de Tarapacá y las depresiones de Lauca, Surire y Caquena - Cosapilla en la región de Arica y Parinacota. A escala regional, esta depresión se encuentra al este de Precordillera y al oeste de la Cordillera Occidental definida por Charrier, et al (2007).

#### **5.4.1.3. Cordillera Occidental**

Corresponde al arco volcánico actual. Se ubica al oriente de la Depresión de los Salares alcanzando altitudes hasta 6.000m s.n.m. Se caracteriza por presentar secuencias volcano sedimentarias del Mioceno – Holoceno.



**Figura 16.** Mapa Geomorfológico del Norte Grande de Chile; Cordillera de la Costa (CC), Depresión central (CD), Precordillera (FP), Depresión de los salares (SD) y Cordillera occidental (WC), línea roja representa sección morfoestructural de la zona de estudio, modificado de Charrier, et al 2007.

## 5.5. Geomorfología Local

El estudio y descripción de la geomorfología local de la cuenca del salar del Huasco fue realizado las instituciones [DGA - PUC \(2009\)](#). Definen y caracterizan el sector como la cuenca piloto del salar del Huasco. El mapeo geomorfológico del trabajo mencionado anteriormente fue llevado a cabo a partir de la interpretación de imágenes satelitales y mapas topográficos, cuyas unidades (Figura 17) serán descritas a continuación:

Corresponde a una cuenca cerrada de 1.471 km<sup>2</sup> de superficie, de morfología ovalada y elongada hacia el norte y el sur. Está delimitada por los cordones montañosos, los cuales se distribuyen en el norte por la meseta de Altos de Pica,



por el oriente con la Cordillera de los Andes cuyas unidades principales son atribuidas a cadenas montañosas que superan en promedio los 4.900m s.n.m. El límite sur está constituido por suaves terrenos volcánicos tales como Pampa Guañada, Pampa León y el Cordón Carcanal.

Los procesos geomorfológicos más relevantes en la cuenca del salar del Huasco son causados por la meteorización química, la cual se hace presente en los centros volcánicos del Plioceno, afectados por la alteración hidrotermal, por otro lado, el labrado y modelación del paisaje está condicionada por la erosión del viento y la acción de los glaciares en el pasado geológico sobre las rocas volcánicas más antiguas (Mioceno superior- Plioceno).

#### **5.5.1. Relieves volcánicos**

Este conjunto geomorfológico está constituido por material volcánico y está definido y clasificado en procesos constructivos (coladas, flujos piroclásticos, lahares, cenizas, arenas, lapilli y conos volcánicos y destructivos) y procesos destructivos (cráteres y calderas volcánicas).

#### **5.5.2. Relieves estructurales y de erosión**

Caracterizados por morfologías retrabajadas por los agentes erosivos, estos corresponden a:

- ✓ Cerros Islas, atribuidos a altos topográficos de morfología suave y alargada, localizados dentro de la cuenca en el sector de Pampa Guañare de Columtucsa y a rocas Cretácicas asignadas a la formación Cerro Empexa.
- ✓ Glacis de erosión, correspondientes a terrenos con pendiente suave, situados entre los altos topográficos y llanuras, que además están recubiertos por cantos retrabajados. Esta última unidad geomorfológica está delimitada por la extensión de la Ignimbrita Huasco.

Otras morfologías erosivas corresponden a la formación de los valles con perfil en V, valles con lechos aterrazados y escapes atribuidos al control estructural de la cuenca del salar Huasco.

### **5.5.3. Relieves de acumulación**

La formación de relieves de acumulación está condicionada propiamente tal por la sedimentación de los materiales transportados por agentes geológicos. La depositación se produce en unas condiciones ambientales de las que queda una impronta en el registro sedimentario.

Entre las principales unidades de acumulación de la cuenca del salar del Huasco destacan los conos aluviales, campos de dunas, glaciares de acumulación y terrazas fluviales. Los conos aluviales, corresponden a morfologías de abanico de baja pendiente, formados por los cauces torrenciales que transportan a los sedimentos provenientes de los cordones volcánicos cuya depositación se extiende hasta el glaciar aluvial. Los campos de dunas, formadas por la acción del viento, de morfología curvada como una S alargada, o bien adoptan solo la forma de una medialuna (tipo barján). Los glaciares de acumulación son similares a los glaciares de erosión, pero, se diferencia en el tipo de material, en vez de estar formado por afloramientos rocosos, su composición está dada por depósitos no consolidados como depósitos aluviales.

Otras unidades geomorfológicas menores de la cuenca del salar del Huasco corresponden a aluvios, derrubios, llanuras de acumulación, llanuras lacustres, llanuras aluviales, lechos fluviales, el salar y terrazas fluviales.



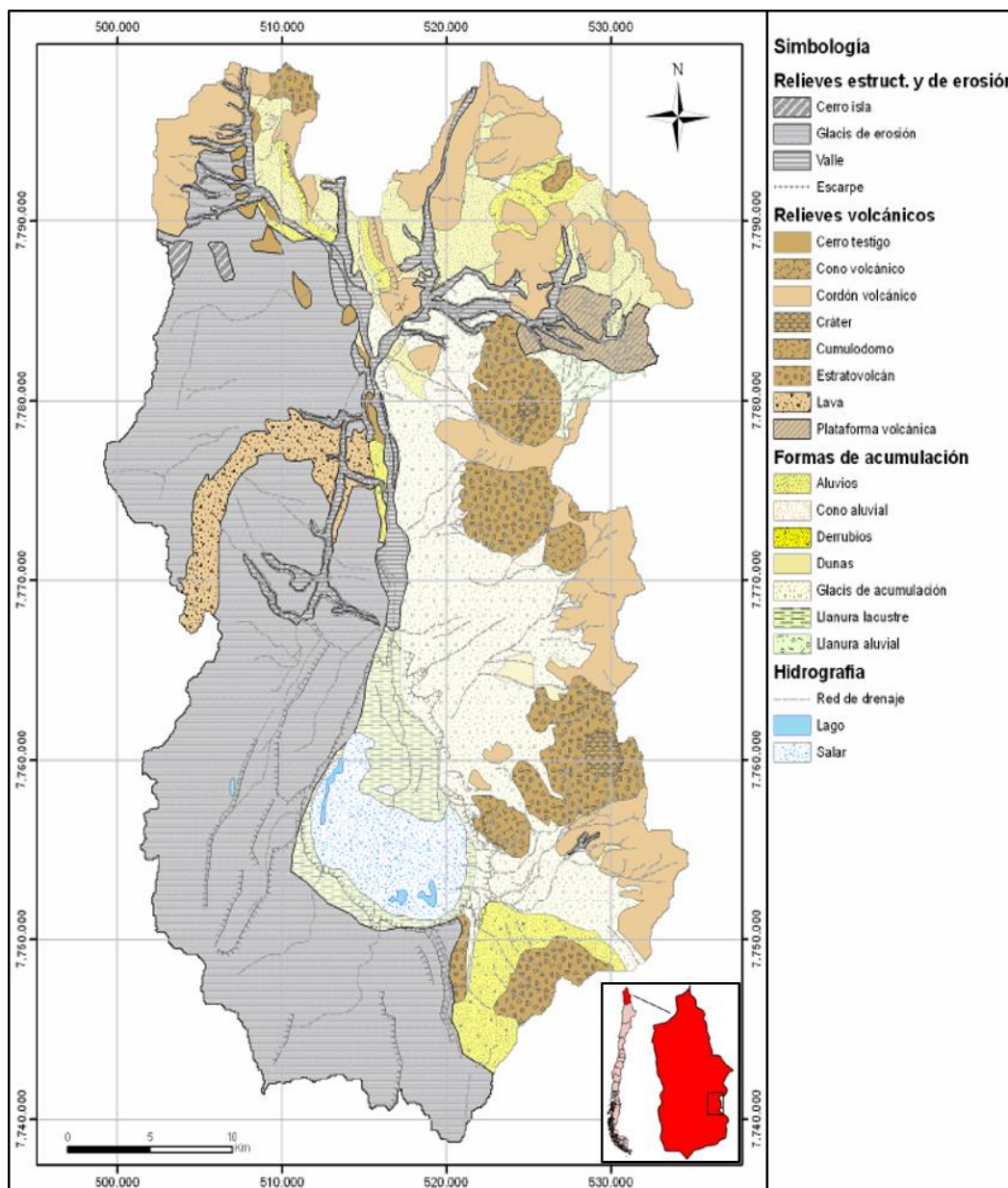


Figura 17. Mapa geomorfológico de la cuenca del salar del Huasco (DGA-PUC, 2009)

## 5.6. Hidrología e hidrogeología del salar del Huasco

### 5.6.1. Hidrología

La Cuenca del salar del Huasco dispone de 4 estaciones meteorológicas, cuya información está disponible al dominio público por la Dirección general de Aguas (DGA).

- ✓ Estación Collacagua, a 27 km al norte del salar (sector del Caserío).
- ✓ Estación Diablo Marca, a 24 al noroeste del salar (Cordón altos del Huasco).
- ✓ Estación Altos del Huasco, a 14 km al noroeste del salar (Pampa Sillillica).
- ✓ Estación Sillillica, a 1,5 km al sur del salar (Pampa León).

Los datos obtenidos por dichas estaciones permiten cuantificar la cantidad de precipitaciones en los meses de verano (enero y febrero) y los meses de Invierno (julio – agosto), donde se observa que los meses más lluviosos corresponde al verano mientras que los meses más secos al invierno (Tabla 13).

Los registros mensuales de datos pluviométricos de las estaciones de la cuenca del salar del Huasco están disponibles en ANEXO D.

**Tabla 13.** Estaciones pluviométricas de la cuenca del salar del Huasco y valores pluviométricos acumulados (mm) registrados en los meses de verano (enero - febrero) y meses de invierno (julio - agosto) 2014-2017, Dirección general de aguas DGA.

Estación	Año	Verano ENE-FEB (mm)	Invierno JUL-AGO (mm)
Sillillica	2013	94,8	0,4
	2014	35,1	3,2
	2015	0	0
	2016	68	0
Diablo marca	2013	66,6	0
	2014	46,8	3
	2015	80,1	0
	2016	28	0
Collacagua	2013	146,1	0
	2014	48,4	1,7
	2015	88,5	0
	2016	25	0
	2017	45	0
Altos del Huasco	2013	14	0,1
	2014	27,5	1,1
	2015	72,2	0
	2016	18	0

## **5.6.2. Hidrogeología del salar del Huasco**

A partir de la recopilación de información y de datos de pozos de exploración del trabajo colaborativo de la DGA y PUC (DGA-PUC, 2009), se logró determinar 4 unidades hidrogeológicas distintas descritas a continuación:

### **5.6.2.1. Acuífero Superior**

Formado por una cobertura sedimentaria uniforme de alta permeabilidad (DGA-PUC, 2009), a lo largo de la red de drenaje principal de la cuenca, al abanico fluvial que desemboca en el salar del Huasco (Acosta y Custodio, 2008) y en la parte baja del sector de pampa rinconada (Figura 18).

En el perfil X-X' (Figura 19) el acuífero superior se extiende el sector de Caserío de Collacagua hasta el sector norte cerca de la cuenca piloto hasta el salar en la laguna temporal. Presenta espesores saturados mínimos de 20m en la zona del humedal y un máximo en el sector de Pampa Batea.

Las variaciones estaciones del nivel piezométrico de este acuífero está sujeto a las condiciones meteorológicas, dicho nivel está asociado al régimen de precipitación y al caudal del río Collacagua y sus principales afluentes (DGA, 2009). Por lo que se propone que debiese alimentar a los matinales que surgen dentro de la laguna al suroeste del salar, (Tröger y Gerstner, 2004).

### **5.6.2.2. Acuífero Medio**

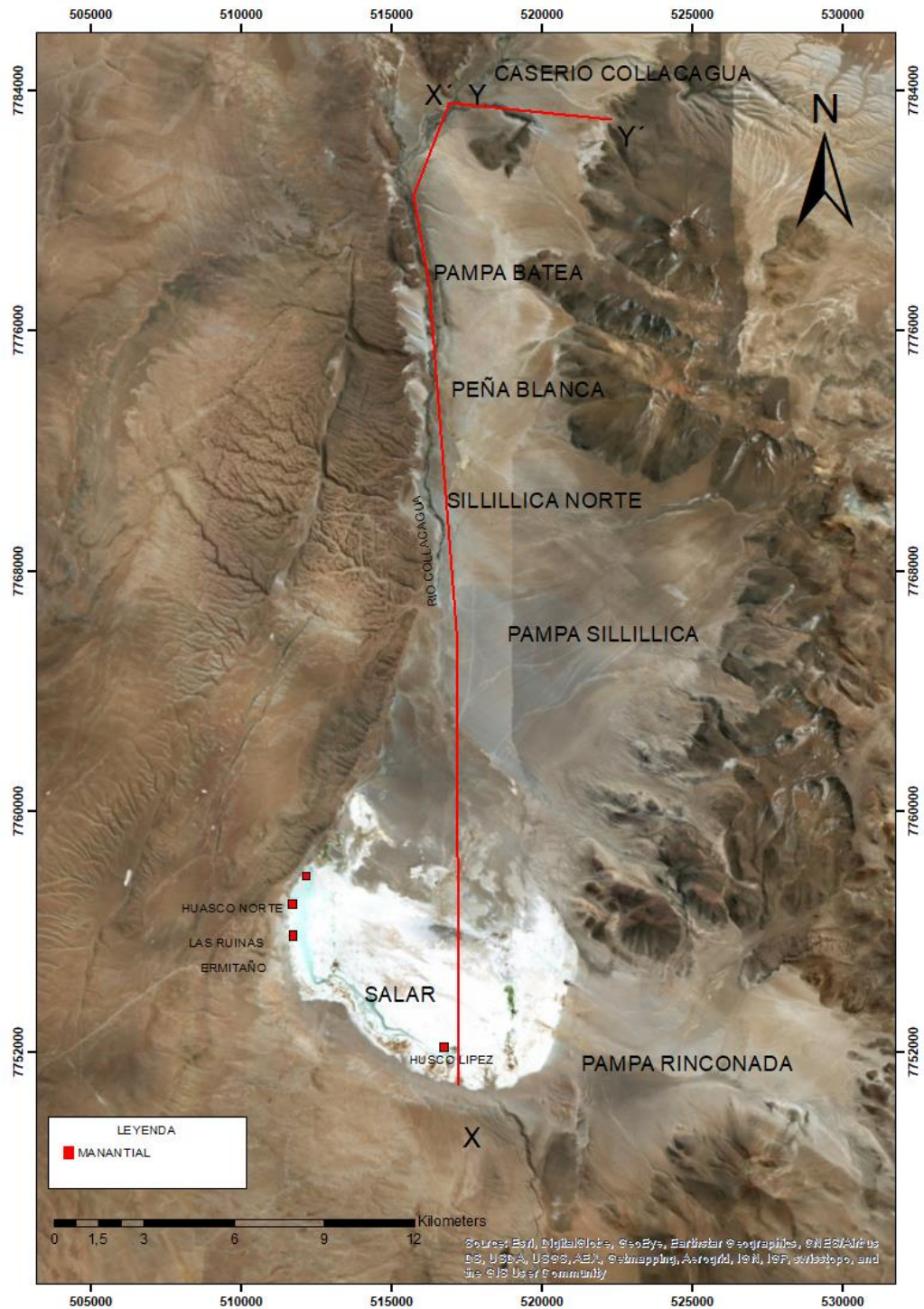
Representa el acuífero principal del sistema hidrogeológico de la cuenca, debido a la capacidad permeable de la mayoría de los materiales litológicos que la componen (Acosta, 2004; Acosta y Custodio, 2008). Está formado por depósitos terciarios que se correlacionan con las unidades medias e inferiores de la Formación Collacagua, definida por DGA-PUC (2009) y que corresponde a cobertura cuaternaria de depósitos lacustres consistentes de gravas, lodos y brechas volcánicas.

En el perfil X-X' (Figura 19), el Acuífero Medio se ubica en el sector del Bofedal de Peña Blanca en interdigitación con materiales arcillosos y fragmentos andesíticos, hasta el sector de la laguna temporal al norte del salar del Huasco. Los espesores promedios que presenta esta unidad son de aproximadamente 200m.

Esta unidad está limitada por estructuras de tipo graven, lo que podría ser importante desde el punto de vista hidrogeológico debido a que pueden funcionar como zonas de alta conductividad hidráulica para el flujo de agua subterránea (Tröger y Gerstner, 2004).

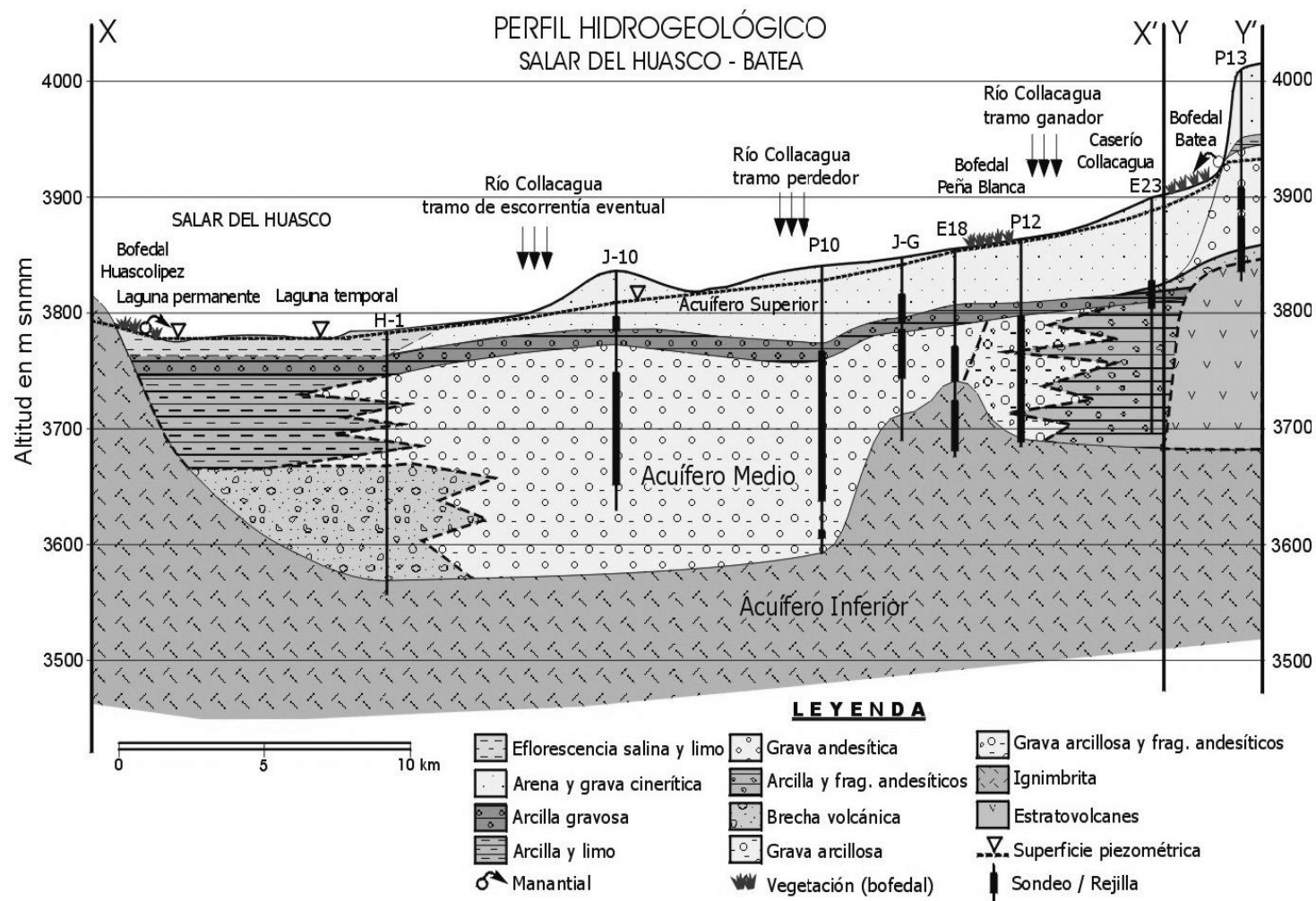
#### **5.6.2.3. Acuífero Inferior**

Compuesto mayoritariamente por la Ignimbrita Huasco (Mioceno Medio) y lavas del Mioceno Superior-Plioceno, las cuales son consideradas como el basamento del salar del Huasco. Esta unidad presenta características hidrogeológicas particulares ya que tiene un potencial de transmisión de flujos de agua, constituyendo un acuífero de roca altamente permeable (Acosta y Custodio, 2008).



**Figura 18.** Mapa de ubicación de transecta del perfil hidrogeológico, principales sectores del salar del Huasco y manantiales (DGA-PUC, 2009).





**Figura 19.** Perfil hidrogeológico del salar del Huasco y sus principales unidades Hidrogeológicas (DGA-PUC, 2009).

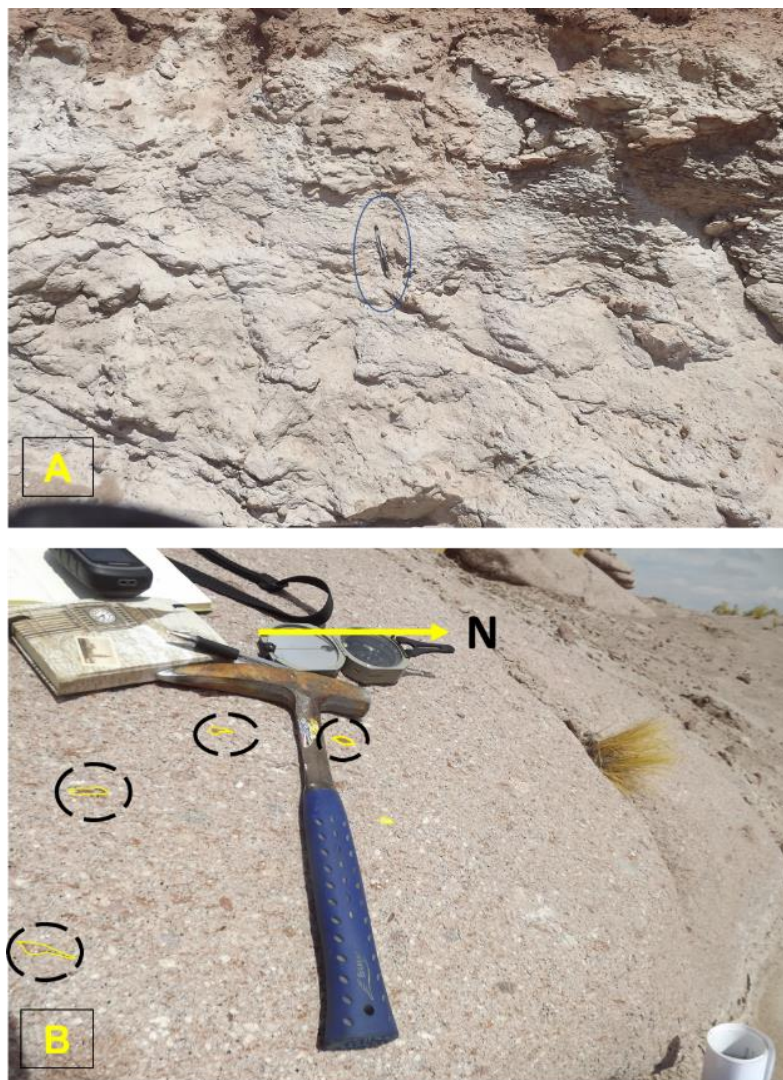
## **6. RESULTADOS**

### **6.1. Geología del salar del Huasco**

#### **6.1.1. Litologías**

##### **6.1.1.1. Ignimbrita Huasco**

Ubicada en el sector oeste, sur y parte del sector sureste del salar homónimo. Los afloramientos del sector oeste del salar en su mayoría están fuertemente fracturados, presentan tonos blancos y rosados, con fragmentos moderadamente redondeados no orientados de ceniza y cristal (Figura 20a) en muestra de mano (HU-10, ANEXO A) corresponde a una Toba vítrea. En tanto, en el sector sureste, específicamente en pampa Rinconada los afloramientos exhiben meteorización débil a moderada en muestra de mano (HU-16, ANEXO A) y presenta cristales de cuarzo de bordes redondeados, cristales de plagioclasa anhedral y subhedral con alteración pervasiva de arcillas, biotita y fragmentos líticos de color pardo rojizos (Figura 20b).



**Figura 20.** Afloramientos de la Ignimbrita Huasco. A) Toba vítrea con fragmentos no orientados, ubicada en el sector oeste del salar, en azul rayador como referencia de escala. B) Toba lítica, delimitada en negro fragmentos de color pardo rojizos con orientación N-S.

Es importante mencionar que algunos afloramientos presentan fuerte diaclasamiento (Figura 21a) con relleno de material salino de color blanco parduzco (Figura 21b), este material (Muestra costra salina HU-15) fue descrito como yeso masivo con colores pardos amarillentos y tintes blancos translucidos. La difracción de rayos X (DRX) indicó la existencia de yeso, cuarzo, albita alta y hexahidrobórta ( $\text{Ca}[\text{B}(\text{OH})_4]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), mineral perteneciente al grupo de los boratos, asociado según diversos autores a la presencia de fuentes hidrotermales.





**Figura 21.** Afloramientos del sector de pampa Rinconada de la Ignimbrita Huasco. A) Afloramiento con fuerte diaclasamiento. B) Relleno de diaclasas con material salino.

#### **6.1.1.2. Estrato volcanes andesíticos y dacíticos**

Se ubican en el sector noreste y sureste del salar, están diferenciados por Vergara y Thomas (1984) según su edad y grado de meteorización: estrato volcanes intensamente erosionados del Mioceno medio y Plioceno y estratovolcanes moderadamente erosionados del Plioceno.

En el sector noreste del salar se encuentra los estratovolcanes intensamente erosionados, estos afloramientos presentan tonalidades negras grisáceas y con meteorización incipiente a débil (Figura 22 a y c), en muestra de mano (Muestra HU-12) corresponde a una andesita (ANEXO A). Así también, a 1 km desde este punto, aflora dentro del salar un domo de 58m<sup>2</sup> de similares características texturales y tonalidades que presenta estratos subhorizontales y morfologías suaves debido a su alta grado de erosión (Figura 22b).

En el sector sureste del salar, adyacente a pampa Rinconada se encuentran estratovolcanes moderadamente erosionados, los afloramientos de esta unidad son escasos en la parte inferior debido a que están cubiertos por depósitos eólicos y gravas. Las rocas que componen esta unidad corresponden a andesitas (de piroxeno y hornblenda) y dacitas en proporciones relativamente equivalentes (Vergara y Thomas, 1984).



**Figura 22.** Afloramientos correspondientes a estratovolcanes intensamente erosionados. A) Afloramiento de color negro parduzco, libreta geológica como referencia de escala. B) Acercamiento del afloramiento. C) Domo andesítico ubicado en medio del salar elongado este-oeste.

### 6.1.1.3. Cobertura cuaternaria

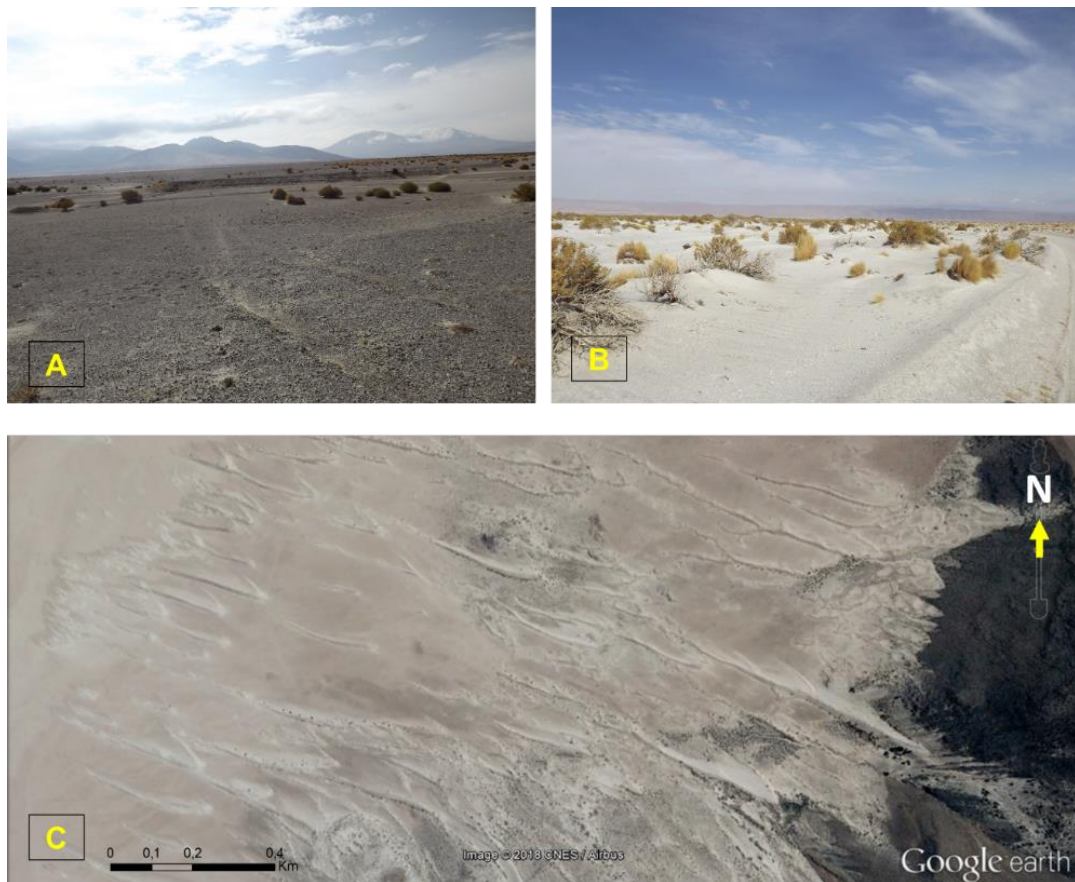
#### 6.1.1.3.1. Depósitos aluviales

Son del tipo aluvial de 45 km<sup>2</sup> de extensión (Figura 23a), se ubican principalmente en el sector norte y oeste del salar del Huasco. Está representada por material no consolidado de gravas con baja presencia de vegetación y compuesta por diversos tipos de clastos con tamaños desde los 2mm hasta 4cm, los que presentan en su mayoría buen redondeamiento y baja esfericidad. La composición corresponde a cuarzo de color blanco y verdosos, fragmentos de andesitas con plagioclasas alteradas a arcillas, tobas rosadas con fragmentos

líticos, tobas cristalinas con piroxenos y biotitas, y fragmentos bien compactados de ceniza.

#### 6.1.1.3.2. Depósitos eólicos

Se encuentran tanto los faldeos de los estratovolcanes erosionados del Plioceno y en las quebradas de la Ignimbrita Huasco en el sector sureste del salar (Figura 23b y c). Presentan tonalidades blancas y amarillentas. Según su granulometría corresponden a arenas de tamaño medio y fino. Se identifican en el sector oriente del salar dunas de tipo parabólicas y en menor proporción de tipo longitudinal en un área cercana a los 20 km<sup>2</sup> (Figura 23c). La orientación y estructuras como cuernos y bordes permiten identificar la dirección preferencial del viento desde el SE.



**Figura 23.** Principales depósitos de cobertura aluvial y eólico del salar del Huasco. A) Zona de gravas, ubicada en el sector norte y suroeste. B) Depósitos eólicos orientales al salar del Huasco. C) Dunas del tipo transversal y longitudinal con dirección del viento desde el SE.



## **6.1.2. Morfologías de las costras salinas**

### **6.1.2.1. Grietas poligonales (*Drying Cracks*)**

Se trata de grietas superficiales poco profundas producidas en costras salinas sulfatadas, producto de la acción de descenso del nivel freático (Vila, 1975). Se identificaron diversas zonas con grietas: Sector de Huasco norte, sector sur de la laguna Permanente y sector de Huasco Lípez, todas cercanas a humedales y vertientes. Las grietas tienen tamaños de 20 a 40cm de ancho con poca a nula orientación, presentan bordes suaves y relleno de material detrítico fino de yeso y halita, las profundidades de los espacios entre las grietas en su mayoría no superan los 2 cm (Figura 24a).

### **6.1.2.2. Montículos salinos (*Mundsprings*)**

Formados a partir de las precipitaciones de las sales disueltas proveniente de la transpiración de plantas halófilas que cementan el montículo salino conforme crece. Cuando las raíces no alcanzan el nivel freático, la planta muere y el montículo se destruye fácilmente (Vila, 1975).

Los mundsprings identificados están presentes en el sector de la laguna Huasco Norte, Huasco Lípez y sector noreste del salar, dispuestos espacialmente en grupos (Figura 24b) o aislados (Figura 24c). Exhiben morfologías discoidales, ovaladas y amorfas con alturas que no superan los 40 cm. La vegetación principal que abastece a estos montículos corresponde en su mayoría a Pasto Iro (ver Figura 2b).



**Figura 24.** Principales morfologías identificadas en las costras salinas del salar del Huasco. A) *Drying cracks* en la zona norte sin orientación. B) *Mundsprings* agrupados en el sector de Huasco Lipez demarcados en línea discontinua amarilla. C) *Mundspring* aislado, ubicado en el sector de Huasco Norte, se resalta en línea amarilla discontinua la longitud del montículo (2,6m).

## 6.2. Aplicación de combinación de bandas con Landsat 8 OLI/TIRS

Posterior a la corrección de la imagen Landsat, se realizó la composición de color RGB de las bandas 5, 6 y 7 propuesta por [Flahaut et al., 2016](#) en la opción que entrega ENVI *Standard* 5.4 conocida como Combinación de Bandas. Esta composición de color distingue tonalidades que se pueden asociar a la distribución de la litología y mineralogía evaporítica.

### 6.2.1. Litologías del Salar del Huasco con imagen LANDSAT 8 sensor OLI

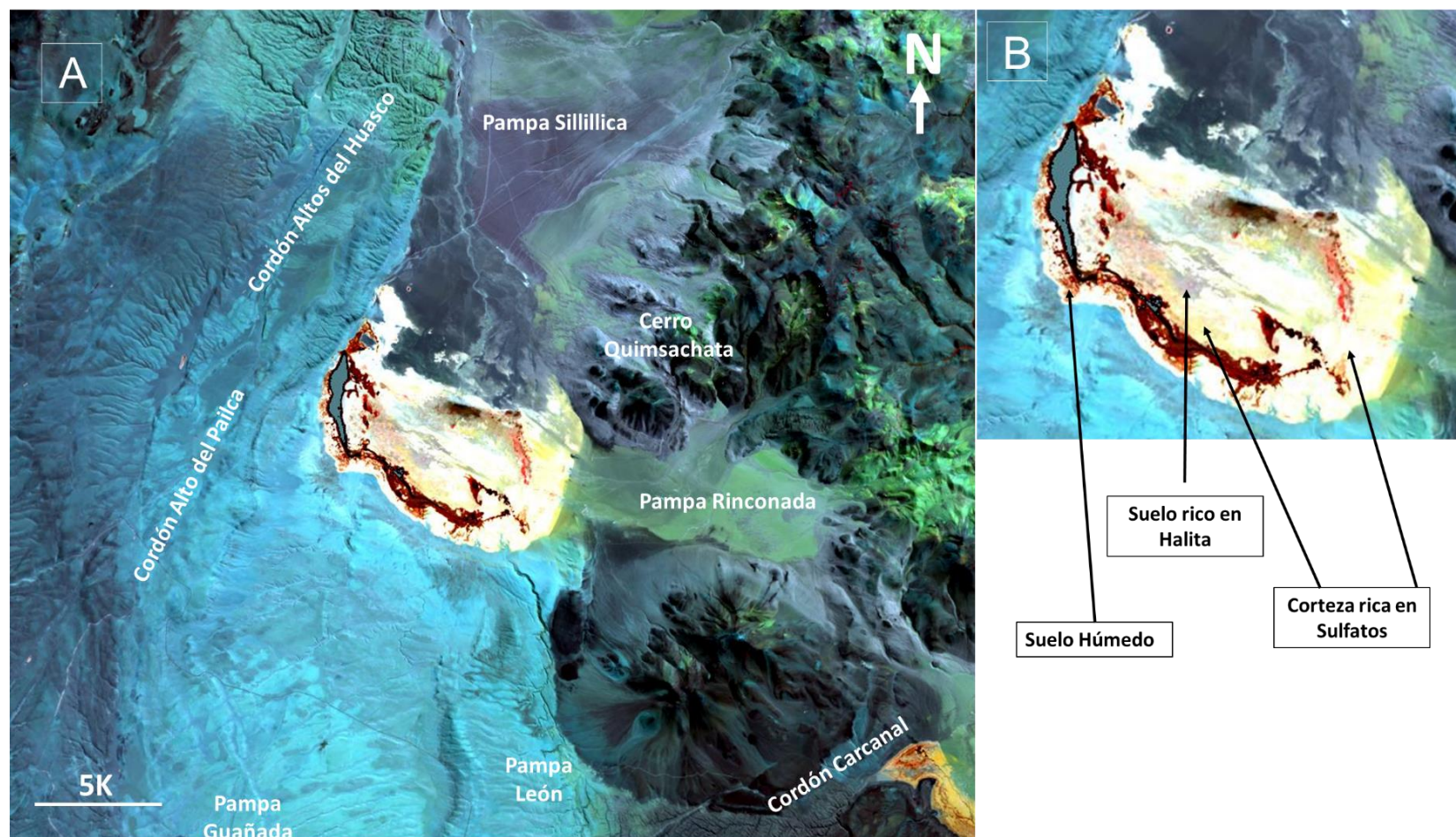
El resultado de la combinación de bandas en RGB (Figura 25a) mencionada anteriormente distingue en tonalidades:

- ✓ Celeste azuladas en el sector del Cordón Altos del Huasco y pardo violáceas en Pampa Sillillica, representando a la Ignimbrita Huasco y la cobertura cuaternaria respectivamente. Estas unidades al igual que el cuadrángulo de la Hoja Collacagua ([Vergara y Thomas, 1978](#)) muestran el contacto por una estructura de norte-sur mencionada como la Falla Huasco por [Gardeweg y Sallés \(2015\)](#).
- ✓ Pardo-Azulados con leves tonalidades amarillas, corresponderían a estratovolcanes andesíticos y dacíticos no erosionados ubicados en el sector oriente del salar, las tonalidades amarillas podrían indicar actividad hidrotermal leve.
- ✓ Amarillas verdosas corresponderían a unidades ubicadas al noreste que posiblemente son correlacionable con los estratovolcanes andesíticos y dacíticos intensamente erosionados del Mioceno- plioceno producto de la intensa actividad hidrotermal.

#### **6.2.1.1. Mineralogía del Salar del Huasco con imagen Landsat 8 OLI/TIRS**

Distintas zonas minerales dentro del salar pueden ser identificadas (Figura 25b) según la metodología que presenta [Flahaut et al., 2016](#).

- ✓ Tonalidades blancas corresponderían a zonas o corteza rica en sulfatos, principalmente en la periferia este del salar.
- ✓ Tonalidades fuertes pardo rojizas, corresponden a suelo húmedo, lo cual es correlacionable con datos propuestos por este autor y también por la vecindad de la principal vertiente enmascarada.
- ✓ Tonalidades grises en el centro del salar es posible identificar un núcleo pequeño de Halita.
- ✓ Tonalidades amarillo claro en el sector noroccidental y algunos sectores menores en el centro del salar a carbonatos y arcillas.



**Figura 25.** Composición de color de Landsat 8 sensor OLI con reflectancia de bandas 5, 6, 7 en RGB, LANDSAT 8. OLI/TIRS. LANDAT 8 OLI, 2017-12-10, 14:46:24 (UTC-4). a) Diferenciación de unidades litológicas del salar. b) Diferenciación mineralógica dentro del salar.



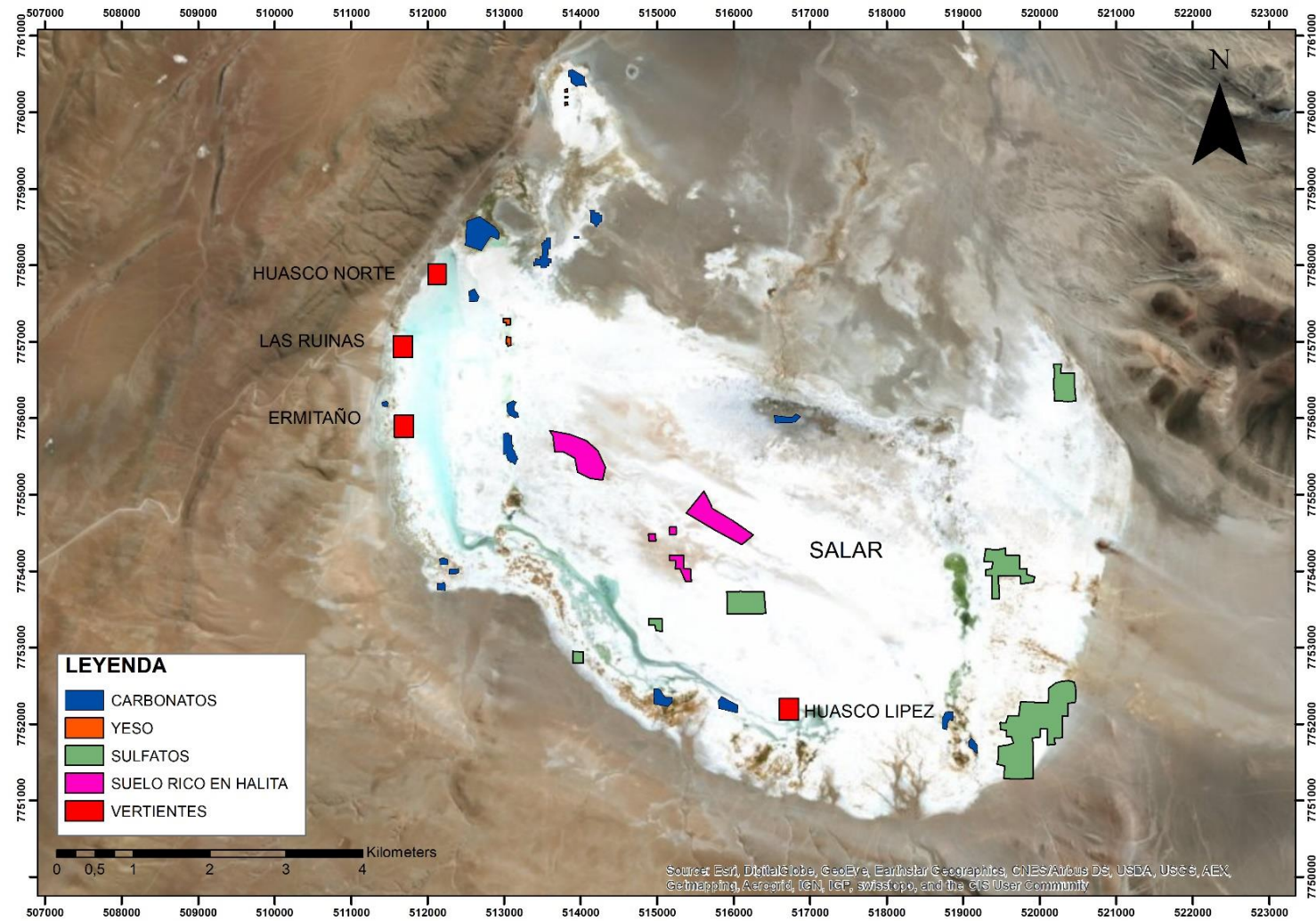
### 6.3. Definición de zonas de interés de muestreo y firma espectral

En base a la aplicación de la combinación de bandas sobre la imagen de reflectancia normalizada (LANDSAT 8/ OLI), se generó un mapa con zonas a ser muestreadas en terreno de costra salina para un posterior análisis de firma espectral. Las combinaciones de bandas (Figura 26) fueron las:

- ✓ 567 propuesta por [Flahaut et al. \(2016\)](#) en RGB para una zona rica en mineral Halita y arcillas (Figura 17b) delimitada en polígonos purpuras en los sectores centrales del salar.
- ✓ 5/7 y 4/7 propuesta por [Flahaut et al. \(2016\)](#) en escala de grises, para una zona rica en sulfatos (Figura 14b) delimitada en polígonos verdes en los sectores del borde este y centro del salar.
- ✓ 1,4,5 propuesta por [Neville et al. \(2000\)](#) en RGB, para una zona rica en yeso, delimitada en polígonos naranjos en el sector oeste y norte del salar.
- ✓ 567 en RGB propuesta por [Flahaut et al. \(2016\)](#), para una zona rica en carbonatos, delimitada en polígonos azules, principalmente en el sector oeste y en el sector sur (Huasco López) del salar.

Debido a la resolución que dispone el satélite Landsat 8 OLI/TIRS de 30x30 por cada píxel, se determinó agrupar los promedios espectrales de las zonas de interés (ROIs), de esta manera el rango de error se reduce, facilitando la determinación mineralógica del salar.



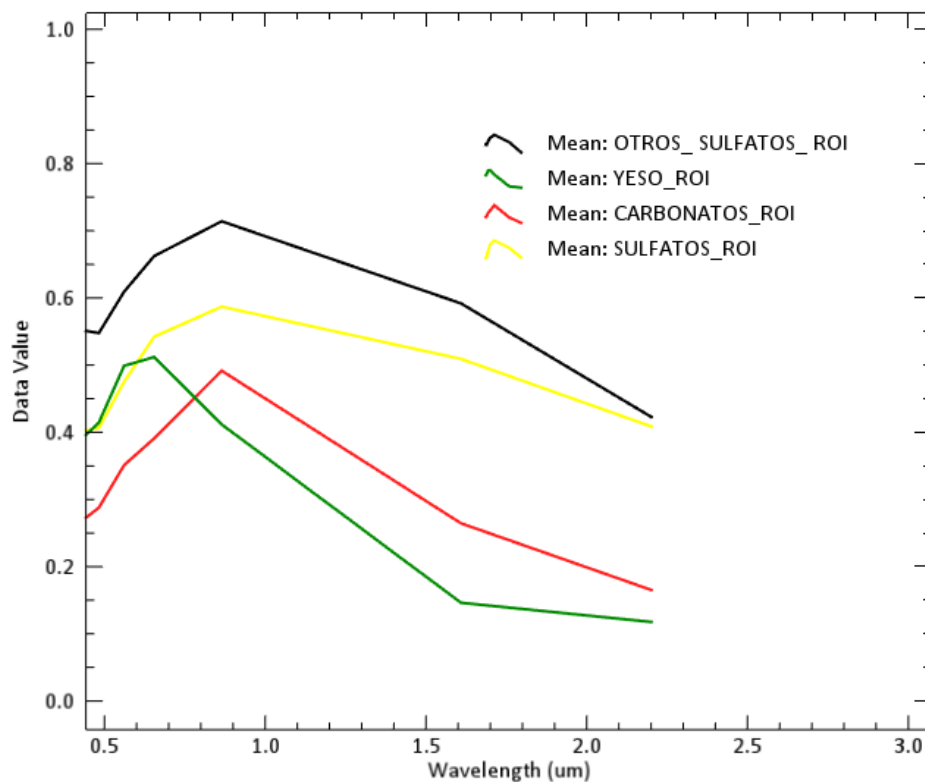


**Figura 26.** Mapa preliminar del salar del Huasco con zonas de interés de muestreo de costra salina a partir del análisis de firmas espectrales.

#### 6.4. Aplicación de firma espectral en región de interés (ROI)

A partir de las zonas de interés de muestreo se generó en el mismo polígono el análisis de zonas de interés (ROIs). Esta zona de interés permite dar valores máximos, promedios y mínimos de las firmas espectrales de los elementos analizar. Las zonas de interés fueron agrupadas por: halita, yeso, carbonatos y sulfatos (Figura 27).

Las firmas espectrales de los grupos minerales (ROIs) fueron comparadas con la librería espectral de la USGS que dispone ENVI 5.4 junto a los principales minerales evaporíticos en las salmueras determinados por [Jones y Deocampo, \(2004\)](#) (Ver tabla 2).

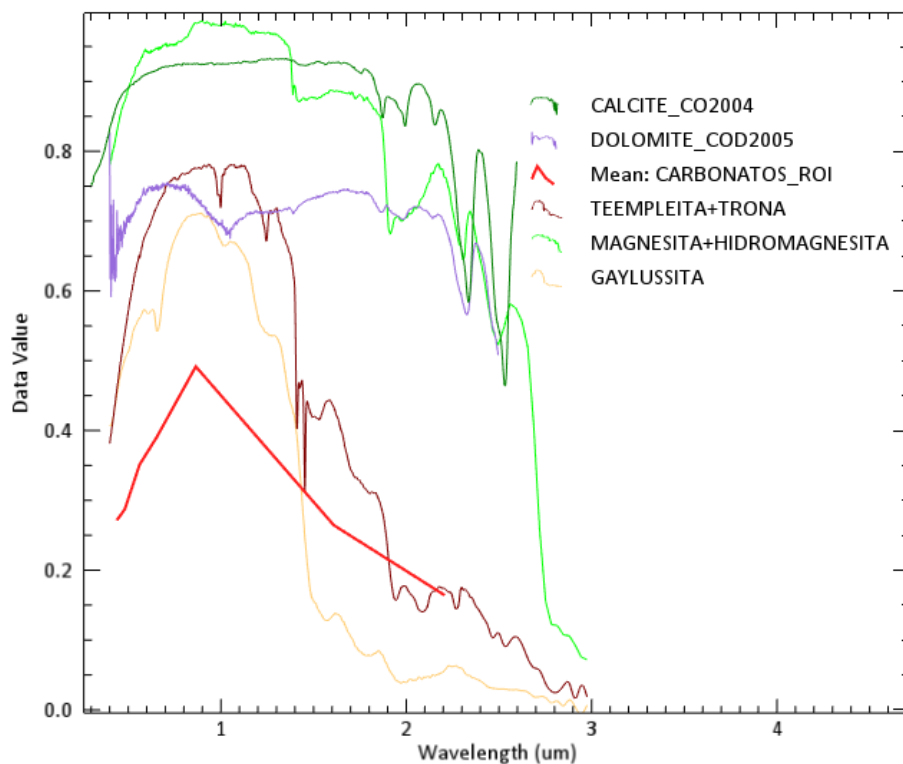


**Figura 27.** Firma espectral de los valores promedios de reflectancias de los grupos minerales analizados a partir de ROIs.

#### 6.4.1. Análisis de firma espectral con ROI en Carbonatos

La firma espectral de los valores promedios de todos los ROIs en posibles zonas de carbonatos presentan picos de emisión de 1 unidad (Figura 27) representado por la línea continua roja “Mean: Carbonatos\_ROI”. Esta firma espectral promedio es comparada con las principales ocurrencias de carbonatos como los polimorfos Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y Dolomita, ( $\text{CaCO}_3$ ), carbonato y bicarbonato de Sodio Trona ( $\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), carbonato de magnesio y carbonato de magnesio hidratado Magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ) y  $(4(\text{MgCO}_3) \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$  respectivamente y Gaylussita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{NaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

Las firmas espectrales asociadas al promedio de la zona de interés (ROI) Carbonatos, muestra una correlación con los minerales propuestos por [Jones y Deocampo, \(2004\)](#), ya que todos los picos más altos de absorción están entre 1 y 1,2 unidades de absorción.

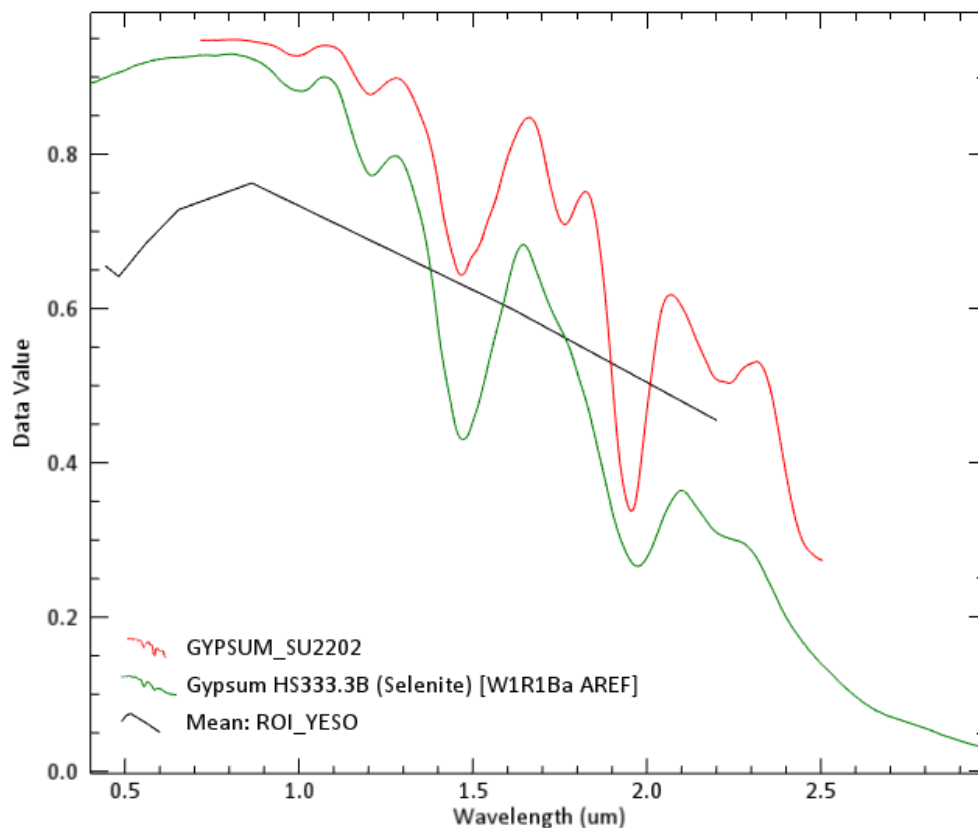


**Figura 28.** Firma espectral de ROI carbonatos vs carbonatos comunes presentes en los salares.

#### 6.4.2. Análisis de firma espectral con ROI en Yeso

Los valores de promedios de todos los ROIs en zonas preliminares de Yeso presenta picos de emisión cercano a 0.9 unidades (Figura 29), representado por la línea continua de color negro "*Mean: ROI\_YESO*". Esta firma espectral es comparada con los perfiles espectrales de la biblioteca que dispone USGS con los minerales Yeso y su variedad transparente Selenita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

La comparación preliminar de estas firmas espectrales evidencia una buena correlación en los valores de reflectancia y longitud de onda, determinando que estas zonas de interés podrían existir yeso y/o selenita.

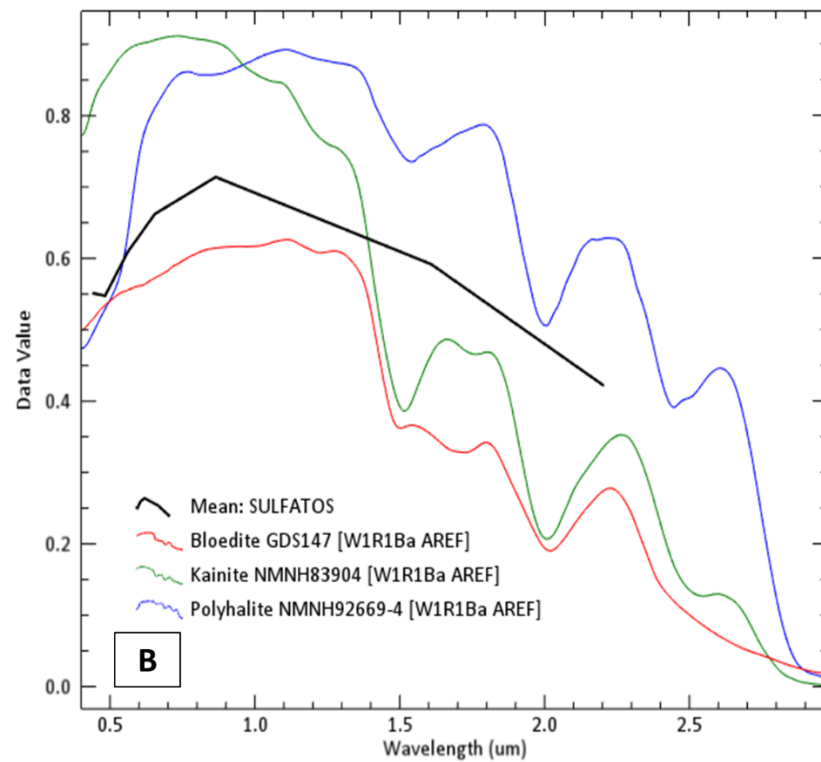
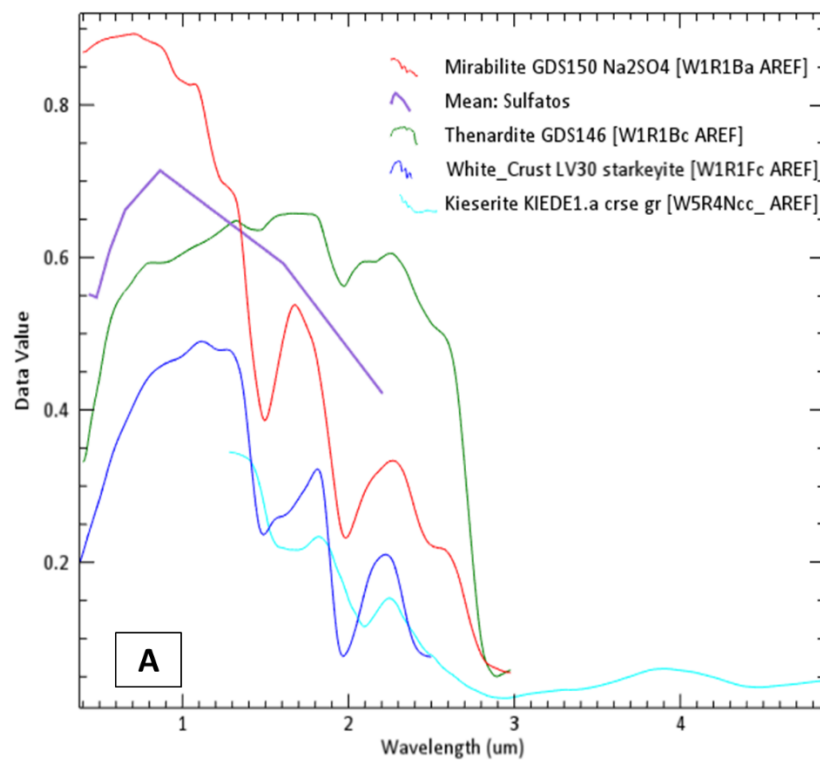


**Figura 29.** Firma espectral de ROI Yeso con librería espectral USGS.

#### 6.4.3. Análisis de firma espectral con ROI sulfatos

Los valores de promedios de todos los ROIs en zonas preliminares del grupo de sulfatos presenta picos máximos de absorción cercano a 0.7 unidades (Figura 30a y 30b), representado por la línea continua de color purpura “Mean: Sulfatos”. Esta firma espectral es comparada con los perfiles espectrales de la biblioteca que dispone USGS con los sulfatos recurrentes en los salares como: Thenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), su homologo hidratado Mirabilita ( $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), el sulfato hidratado de magnesio Starkeyita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), Kieserita ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), el sulfato hidratado de sodio y magnesio Blöedita ( $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), el sulfato de potasio y magnesio Kainita ( $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) y el sulfato hidratado de potasio, calcio y magnesio Polihalita ( $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

La comparación de los espectros del ROI con los minerales evaporíticos de sulfatos, presentan una buena correlación en los minerales Starkeyita y Mirabilita (Figura 30a), así también, con los sulfatos Blöedita y Polihalita (Figura 30b).

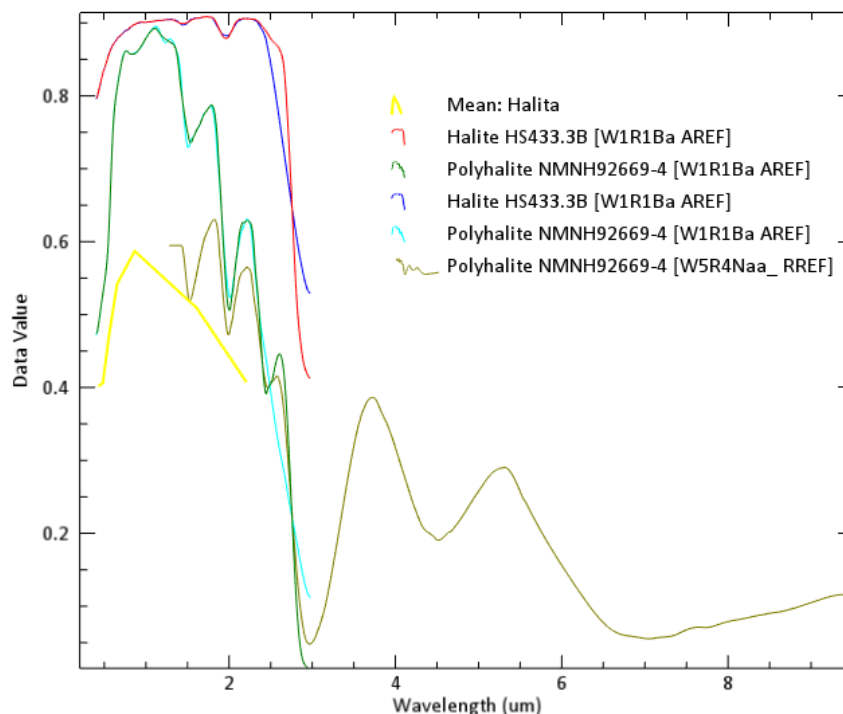


**Figura 30.** Firma espectral de ROI sulfatos con librería espectral USGS.

#### 6.4.4. Análisis de firma espectral de ROI Halita (NaCl)

El ultimo mineral analizado corresponde a la halita, caso particular, ya que presenta mayor cantidad de datos y estudios espectrales. Los valores de promedios de todos los Rois en zonas preliminares de Halita presenta picos de absorción cercano a 1 unidad (Figura 31), representado por la línea continua de color amarillo “*Mean: Halita*”. Esta firma espectral es comparada con los perfiles espectrales de la biblioteca que dispone la USGS con varias muestras de Halita (NaCl) y Polihalita ( $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ).

Comparativamente la firma espectral perteneciente al ROI de Halita versus los minerales de la librería espectral presenta correlación en la forma de la curva y en los picos máximos de absorción (1 unidad), sin embargo, los valores de los minerales de la librería tienden a ser más altos y tener mayores longitudes de ondas, esto posiblemente estaría relacionado a que la superficie analizada en la imagen satelital atribuida a halita estaría húmeda, permitiendo así valores más bajos.

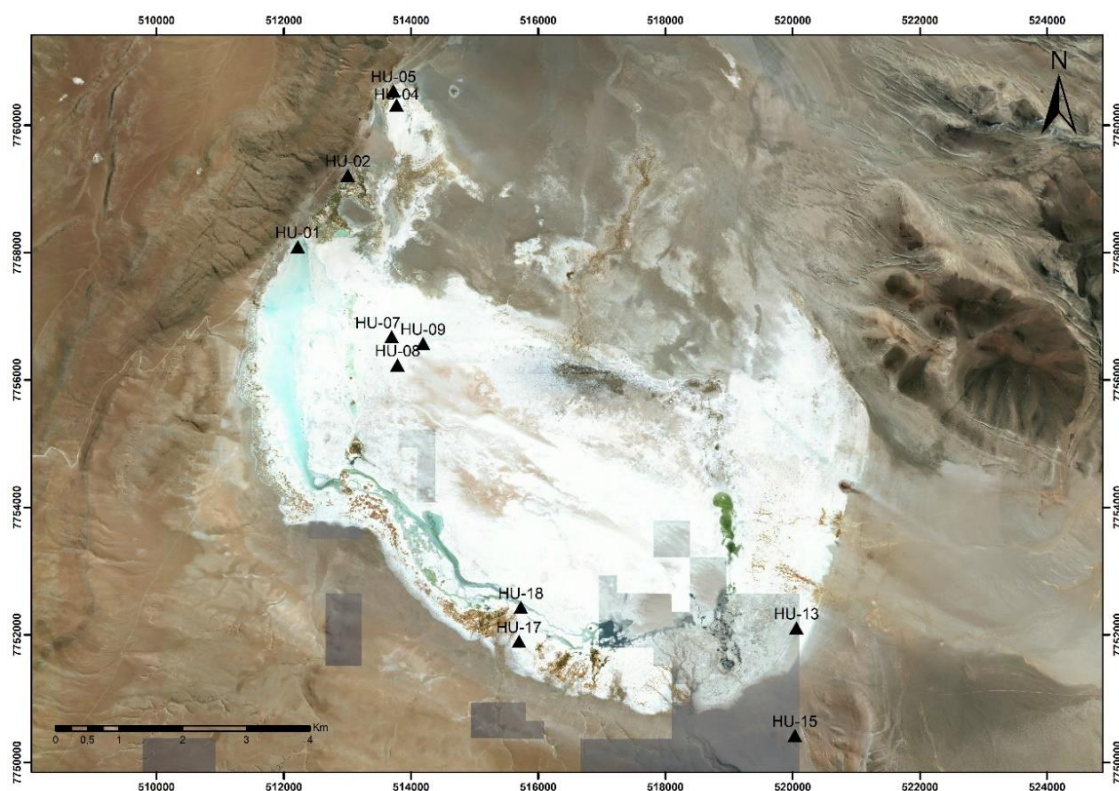


**Figura 31.** Firma espectral de ROI Halita con librería espectral USGS.



## 6.5. Muestreo de costra salina

A partir del mapa preliminar de las zonas de interés (ROI) se llevó a cabo en terreno el muestreo de costra salina (Figura 32). La recopilación de muestras fue mediante envases plásticos de doble tapa en donde una vez depositada la muestra se añadieron bolsas de Silica gel para preservar las condiciones de humedad original.



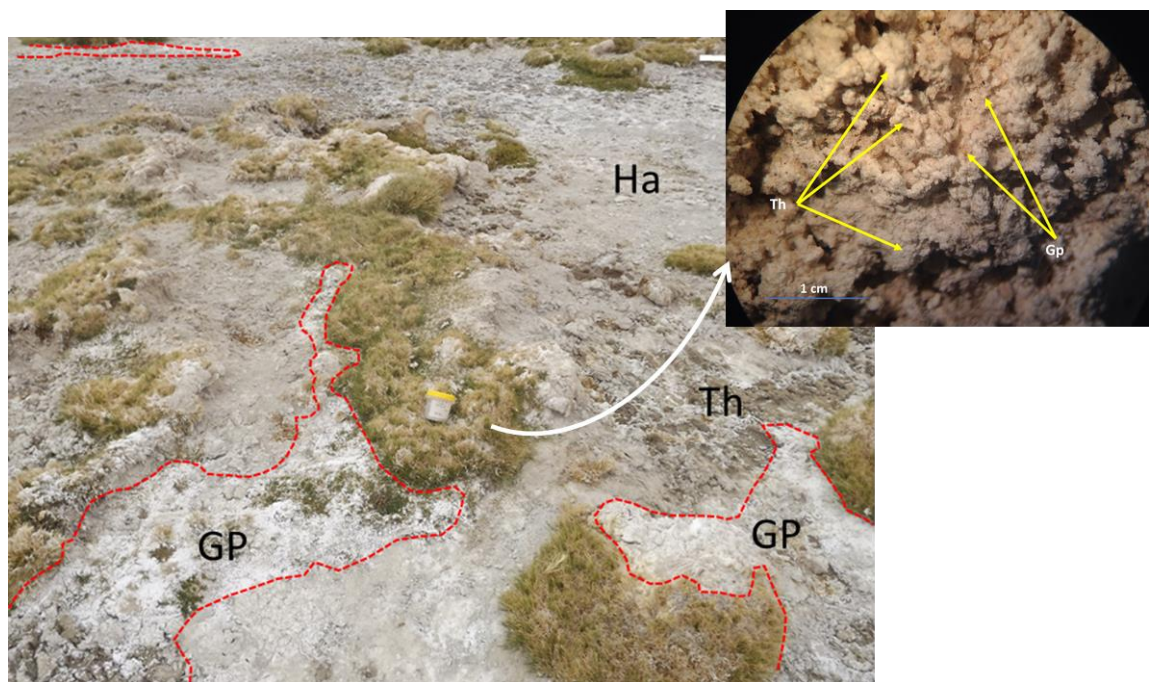
**Figura 32.** Mapa de puntos de muestreo en el salar del Huasco, muestra HU-15 corresponde a muestreo de relleno de diaclasas. Imagen SAS *planet* 2018.

Los sectores norte y centro norte de salar cuentan con abundante precipitación de sales, junto a la vegetación halófila del sector. Principalmente en estos sectores denota la presencia de costra salina asociada a sulfatos de color blanquecino y pardo blanquecino, así también, la presencia de trazas de azufre



(Muestra HU-01) amorfas, de color distintivo amarillento, junto con la presencia de arcillas de color blanco y arcillas de playa.

La asociación mineralógica de dichos sectores está representada por la presencia de Halita ( $\text{NaCl}$ ), Thenardita ( $\text{NaSO}_4$ ) y Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), estos tres minerales evaporíticos presentaron poca precipitación, el caso más representativo de este fenómeno corresponde a la Halita el cual es dominado en varios sectores por salmueras y bajo porcentaje de cristales. En la figura 33 se observa dicha asociación mineralógica, así también se observa la zonación de precipitación de los minerales desde los sectores periféricos hasta las zonas más concéntricas. Este orden de precipitación obedece la solubilidad que presentan los minerales evaporíticos en base a una salmuera primitivas.



**Figura 33.** Principales asociaciones mineralógica evaporítica en el sector norte del salar del Huasco, en rojo se observa la precipitación de yeso con sulfato sódico Thenardita, en el fondo de la imagen se observa la presencia de Halita con poca a nula precipitación

## 6.6. Análisis de difracción de rayos X (DRX)

Las composiciones mineralógicas cualitativas de las muestras obtenidas en terreno son presentadas en la tabla 15. En ella se puede observar una gran variedad de minerales evaporíticos, predominando los sulfatos, haluros, silicatos y carbonatos.

Nuevos minerales no reportados, asociados al grupo de los boratos son mencionados en este estudio, estos corresponden a: Blöedita, Inyoita, Hilgardita e Hexahidrobórta. Este último (HU-15) se encontró en relleno de vetillas, en el sector de pampa rinconada junto a rocas asociadas a la Ignimbrita Huasco, las otras muestras, por su parte se ubicaron en las mediaciones de vertientes del sector noroeste (refugio norte del salar).

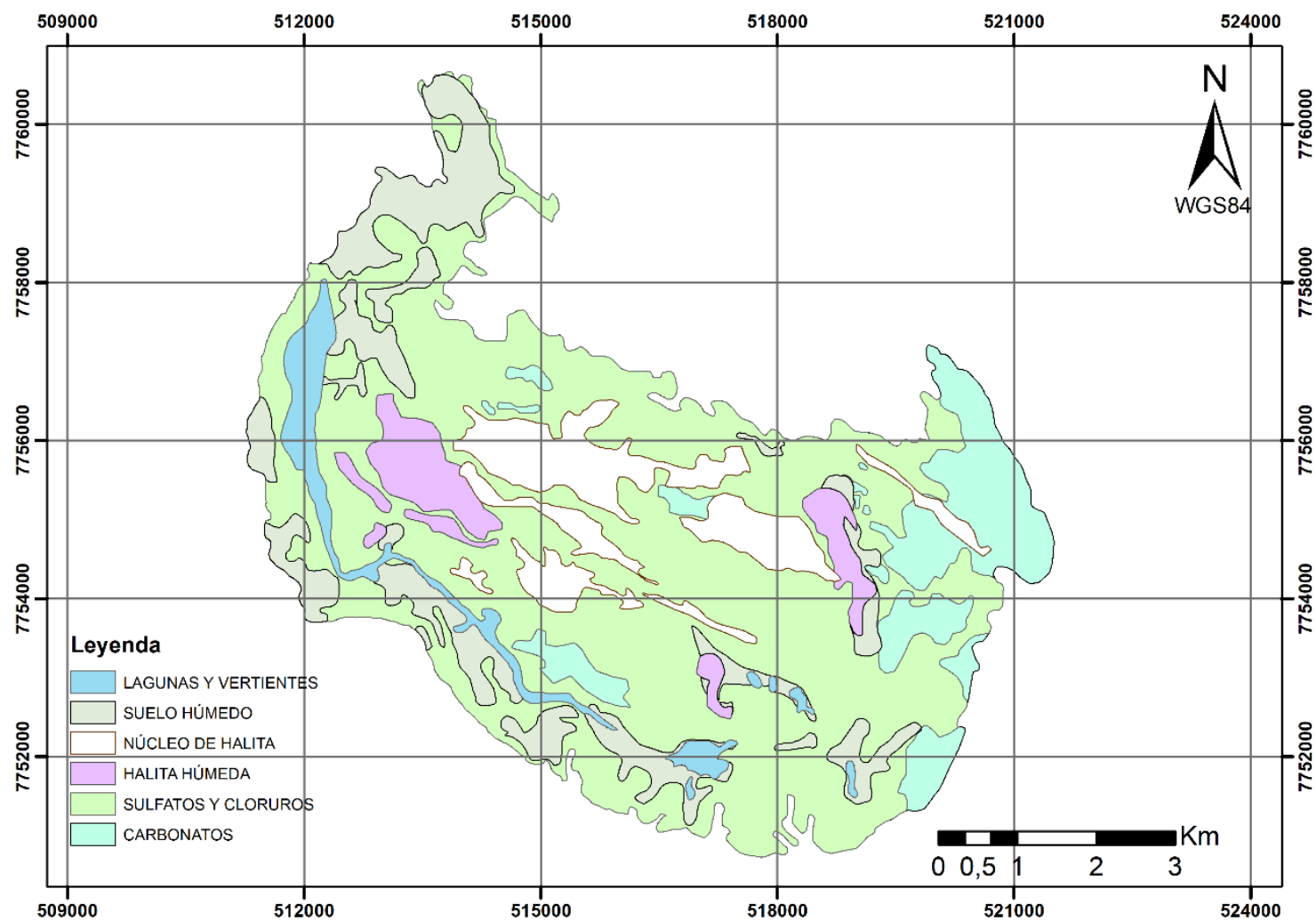
**Tabla 14.** Resultados de la difracción de rayos X, Ensamblajes minerales del salar del Huasco.

MUESTRA	MINERALOGÍA
HU-02	Thenardita, Calcita, Halita, Cuarzo bajo, Albita, Burkeita, trazas de azufre
HU-04	Calcita magnésica, Thenardita, Halita, Nitratina, Eugsterita, Blöedita
HU-06	Halita, Yeso, Eugsterita, Dolomita, Singenita, Cuarzo, Nitratina, Stilbita, Inyoita, Thenardita
HU-08	Halita, Singenita, Yeso, Thenardita, Aroganito, Hilgardita, Aphthitalita, regaljar
HU-13	Yeso, Halita, Eugsterita, Cuarzo Bajo, Singenita
HU-15	Yeso, Cuarzo, Albita alta, Hexahidrobórta
HU-17	Halita, Yeso, Eugsterita, Dolomita, Singenita, Potassium alum, Ameghinita
HU-18	Halita, Thenardita, Calcita magnesica, Silvita, Georgeyita, Nitratina, Cristobalita, Hanksita

### **6.7. Mapa de evapofacies del salar del Huasco**

El análisis realizado fue llevado a cabo a través de la imagen satelital Landsat 8 OLI/TIRS: LC08\_L1TP\_001074\_20171210\_20171224\_01\_T1 (Ver figura 9), con las combinaciones de bandas 567, fue posible identificar distintos grupos minerales y en adición a ello una zonación salina (Figura 34).

La zonación de las evapofacies del salar del Huasco está configurada por una zona dominante de carbonatos, distribuidos en el sector nororiental y oriental del salar adyacente a Pampa rinconada. El grupo de sulfatos no presenta una orientación y distribución definida, ocupando un área cercana al 80% del salar. La evapofacie más insoluble halita se encuentra dispuesta en el sector centro del salar, este núcleo halítico no es concéntrico y se encuentra fraccionado, con morfologías estriadas de orientación WNW-ESE. Finalmente, en la imagen satelital fue posible identificar pixeles relacionados a zonas húmedas en conjunto con pixeles asociados a costra salina halítica, lo que podría interpretarse una zona de Halita húmeda.



**Figura 34.** Mapa de zonación mineral del salar del Huasco, realizado a partir de procesamiento de imagen satelital LANDSAT 8 diciembre 2017.

## **6.8. Análisis espacio temporal**

### **6.8.1. Análisis espacio temporal para meses de verano**

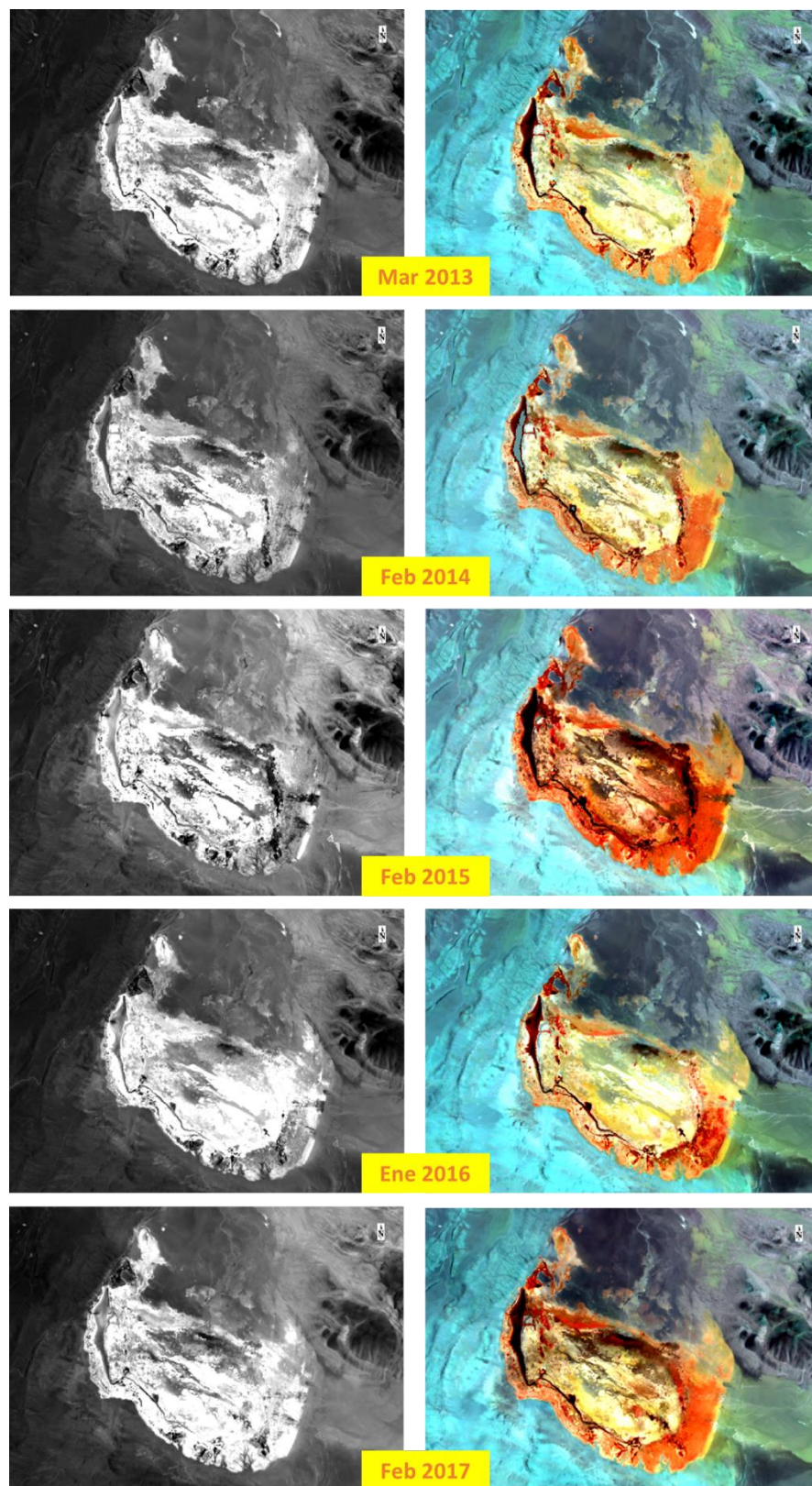
Las imágenes de los meses de verano poseen tonos rojizos y anaranjados en prácticamente todos los bordes, intensificándose más en el borde oeste del sector de pampa rinconada, para las fechas 2014, 2014 y 2017 (Figura 24).

Para todos los meses de verano los tonos rojizos representan zonas húmedas, principalmente en zonas cercanas a lagunas y afloramientos de agua los que se combinan con tonos blanquecinos dado como producto el tono anaranjado. Los tonos amarillos que corresponderían a carbonatos y arcillas se presentan en reducidas zonas tanto en el borde oeste como en el sector central del salar, este último sector se entremezcla con tonos blancos y grises, mencionados anteriormente como sulfato y corteza halítica respectivamente. Por tanto, la distribución del núcleo de halita para los meses de invierno pierde orientación y tendencia distintiva.

Dada la tabla de precipitaciones mensuales es posible identificar los años más secos (periodos transgresivos) y más lluviosos (periodos regresivos), en el rango de tiempo definido para este estudio, estos fenómenos son captados en las imágenes satelitales representados por la intensificación y atenuación de tonos rojizos mencionados. La aplicación de los anterior da cuenta que la disponibilidad de lluvias tiende a disminuir conforme pasan los años. Los meses de verano más lluviosos corresponden a marzo del 2014 y febrero 2015, en las imágenes satelitales (Figura 35) los tonos grises correspondiente a las fases más solubles en núcleo del salar se presentan parcialmente ausentes.

La proporción de precipitación de sales puede ser determinado usando la combinación de bandas en RGB color natural 442 en escala de grises, lo que da como resultado un 40-60% de costra salina (Figura 24 izquierda). Este porcentaje varía según la disponibilidad de precipitaciones, composición del agua salobre, temperatura y la evaporación.

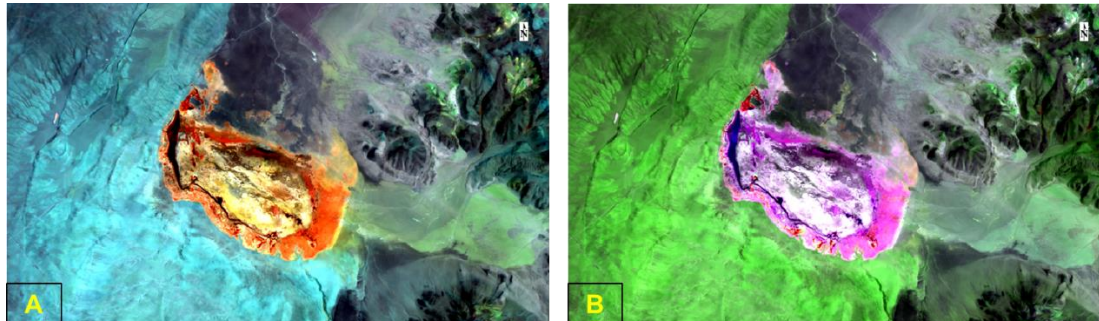




**Figura 35.** Analisis espacio temporal del salar del Huasco .Izquierda: Combicacion de bandas en colornatural 442 escala de grises. Derecha: Combinacion de bandas 567 en RGB para los meses de verano 2014 – 2017.

La aplicación de la combinación de bandas 564 (Figura 36b) permitió corroborar la presencia de zonas húmedas en gran parte del salar, esta combinación es conocida por identificar y separar zonas de agua con zonas de tierra. En el salar del Huasco los tonos que representan dichas zonas estarían dados por violetas oscuros e intensos (laguna permanente y afloramientos de agua) y tonos de violetas claros para sectores húmedos, mezclados con sulfatos, carbonatos, corteza halítica y arcillas.

Es posible comparar en tonalidades las combinaciones de bandas 567 vs 564 para el salar Huasco, los rojizos y anaranjados (Figura 36a) son remplazados por los violetas y violetas claros (Figura 36b), permitiendo visualizar que no solo el salar presenta zonas húmedas, sino que también el sector de pampa Sillillica y el sector de pampa Rinconada. La ocurrencia de zonas húmedas en estos sectores podría atribuirse a la esorrentía superficial de las precipitaciones y/o la activación del acuífero superior, representado por la cobertura sedimentaria uniforme de alta permeabilidad.



**Figura 36.** Comparación entre combinación de bandas para zonas húmedas dentro del salar del Huasco en RGB, febrero 2017. A) salar del Huasco con combinación 564. B) Imagen salar del Huasco con combinación 567 LANDSAT 8 OLI/TIRS, 14:46:14 (UTC-4).

### 6.8.2. Análisis espacio temporal para los meses de invierno

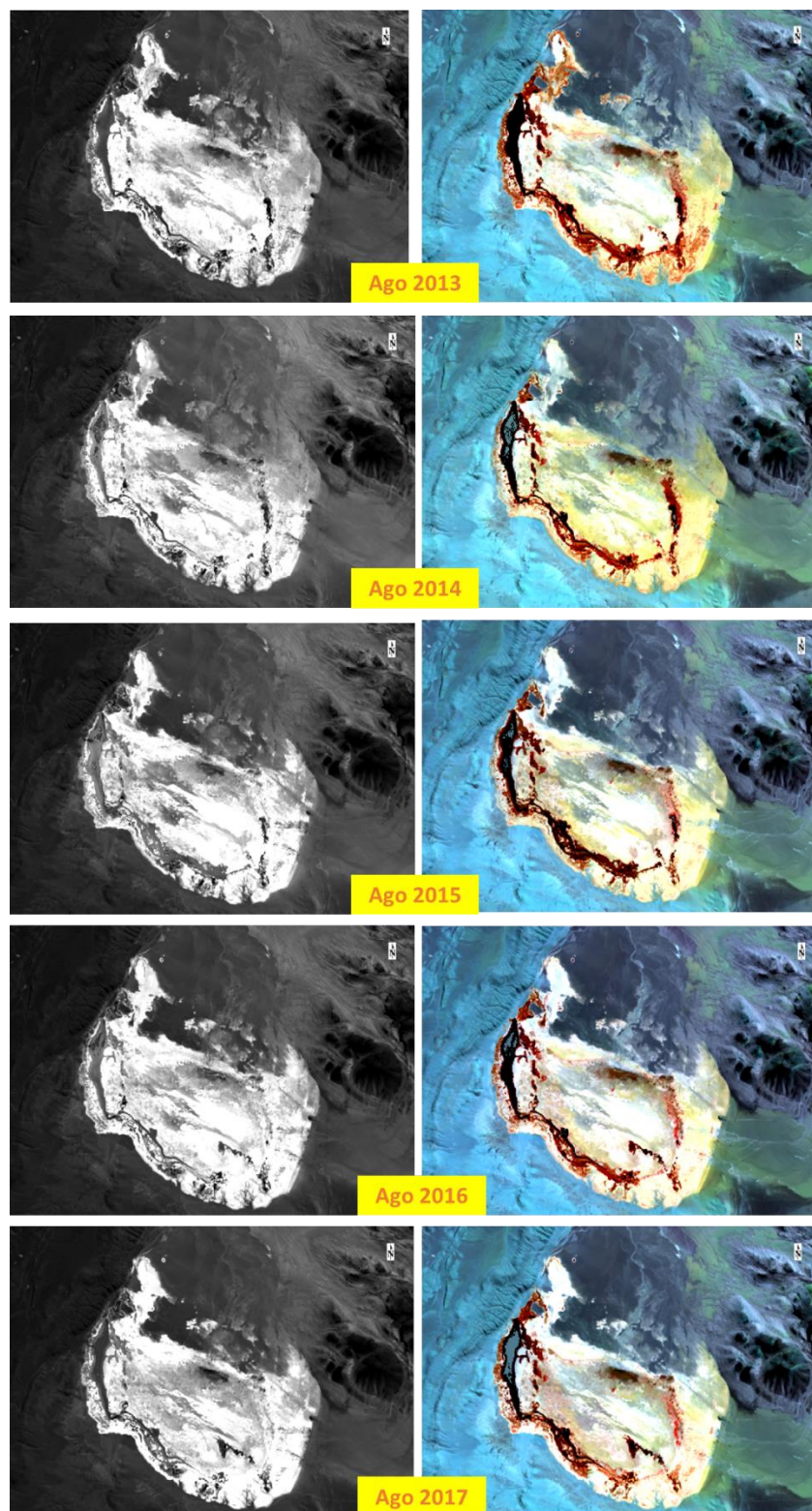
Las imágenes satelitales en los meses de invierno presentan buena visualización de la distribución de los evapofacies y de tonalidades blancas, amarillas, grises y rojizas de los meses de verano. Esta claridad espacial permite comprender de manera más simple la variación espacial de las salmueras dentro del salar.

Es posible observar una buena distribución de tonos amarillos y blancos en el borde este de pampa Rinconada, atribuyéndose a grupos minerales de fases insolubles y semi insolubles, carbonatos y sulfatos respectivamente (Figura 37 derecha). El sector central del *bull eye* halítico permanece casi sin variaciones a excepción de los años 2016 y 2017 donde se entremezcla con tonos anaranjados y rosados, este último correspondería a la prolongación de zonas húmedas, asociado a la laguna y afloramientos de agua en el sector suroccidental del salar.

Dada la tabla de precipitaciones mensuales es posible identificar que en los meses sin lluvia (Julio- agosto) el salar del Huasco presenta periodos regresivos (aumento de la evaporación y precipitación de sales), lo cual es reflejado en un notorio aumento de la costra salina identificado en las imágenes de escala de grises de la Figura 37. El porcentaje de costra salina es considerado a partir de la proporción de tonos blancos y grises con la combinación de bandas en RGB color natural 442.

Las variaciones de las salmueras para los meses de invierno son identificables en el sector suroccidental, adyacente a la laguna permanente, allí se ve registrado como varia en los años lluviosos (2014) con tonalidades grises y blancas versus los años menos lluviosos (2017) con tonalidades grises anaranjadas con morfologías helicoidales de orientación NNW-SSE.



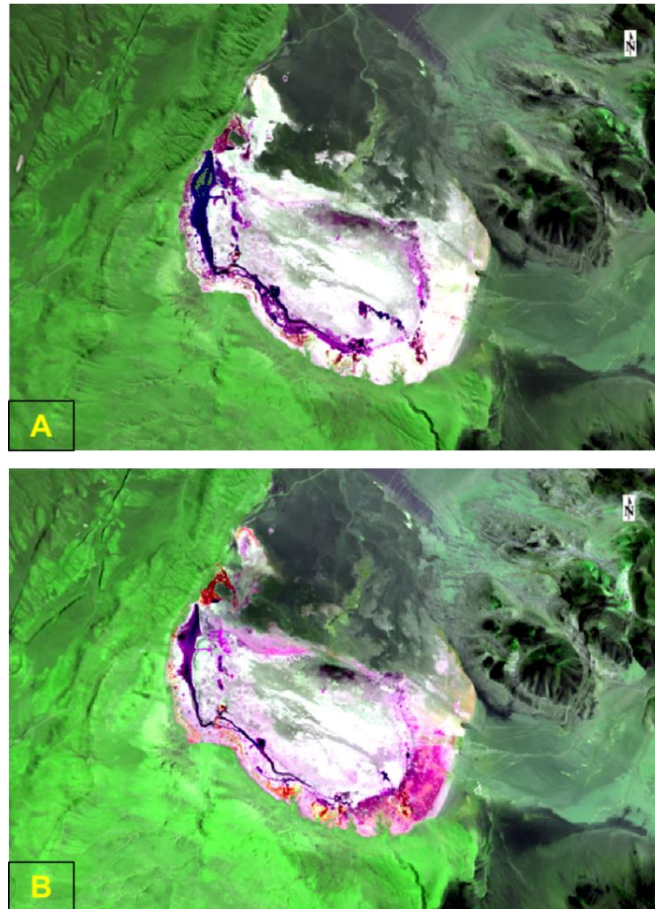


**Figura 37.** Analisis espacio temporal del salar del Huasco 2014 – 2017. Izquierda: Combicacion de bandas en color natural 442 escala de grises. Derecha: Combinacion de bandas 567 en RGB para los meses de invierno.

Finalmente, fue posible identificar aumentos y disminuciones superficiales en los afloramientos de agua y en la laguna permanente con respecto a los cambios estacionales, intensificándose en el sector de la laguna permanente. La combinación de bandas 564 permitió:

- ✓ Identificar los cuerpos de agua y diferenciarlos con cuerpos de tierra.
- ✓ Comparar imágenes en distintos periodos estacionales.

Estos dos análisis evidencian la superficie espacial que ocupan los cuerpos de agua, determinado que hay un aumento en los meses de inviernos versus una disminución substancial en los meses de verano.



**Figura 38.** Comparación de espacio temporal para los cuerpos de agua en los meses de invierno y verano del año 2016, LANDSAT 8 OLI/TIRS en RGB. A) Salar del Huasco en meses de invierno, imagen tomada 17/08/16 (UTC-4), 14:46:20. B) Salar del Huasco en meses de verano, imagen tomada 22/01/16, 14:46:20 (UTC-4).

## **7. DISCUSIÓN**

### **Disponibilidad de las imágenes satelitales**

El seguimiento de la distribución de ensambles minerales en el salar del Huasco permite dilucidar el comportamiento de las salmueras frente a periodos transgresivos y regresivos en un determinado periodo de tiempo. El tiempo de seguimiento para este estudio se limita debido a que algunos satélites LANDSAT presentan problemas en la captura de imágenes y otros sencillamente están fuera de operación lo que implica que existan periodos en donde no hay disponibilidad de imágenes.

En un caso hipotético: un estudio espacio temporal de 20 años desde el año 1997 hasta el año 2017 necesitaría realizar lo siguiente (Tabla 14): se comienza el estudio y corrección de las imágenes satelitales con el satélite Landsat 5 y su sensor TM hasta el año 1999; Landsat 7/ETM+ hasta el año 2002 puesto a que las imágenes satelitales multiespectrales en el salar del Huasco presentan líneas oblicuas producidas en la captura de la imagen, seguidamente existe un gap de casi 10 años hasta el lanzamiento del satélite Landsat 8 OLI/TIRS en el año 2012.

Este gap de imágenes puede ser solucionado por el satélite ASTER, lo que implicaría otro tipo de procesamiento, anexo al que se utilizó en este trabajo ya que las imágenes de este satélite contienen 14 bandas. Adicionalmente, se requeriría realizar comparaciones en las estadísticas de bandas de todos los sensores remotos para una calibración estándar y combinación de banda adecuada.

**Tabla 15.** Estudio de un periodo de 20 años de seguimiento en el área del salar del Huasco.

Satélite /Sensor	Fecha imagen
Landsat 5 /TM	1997
Landsat 7/ETM+	2002
TERRA/ ASTER	2008
Landsat 8/ OLI	2012 y 2017

### **Posibles causas de la distribución de las evapofacies en el salar del Huasco**

Las causas de la distribución de las evapofacies en el salar del Huasco podrían estar condicionadas por las proporciones de evaporación, evapotranspiración producto de la flora del salar y temperaturas del ambiente lo que implica las proporciones de precipitación de la salmuera, ya que al evaporarse el agua precipita una secuencia de minerales de solubilidad creciente. Cada vez que un mineral precipita la composición de dicha solución cambia ([Risacher et al., 1999](#)).

Otros factores que condicionarían la distribución de los minerales corresponderían a los aportes de los flujos y su quimismo. Este último concepto ha sido estudiado por la [DGA-PUC \(2009\)](#) determinando distintas zonaciones de las aguas a partir de la geoquímica e isotopos. Estos sectores estarían dominados por:

- ✓ Aguas bicarbonatadas cálcicas en el sector norte.
- ✓ Aguas sulfatadas cálcicas en el sector sureste.
- ✓ Aguas sulfatas sódicas en el sector central y suroccidental

Dado lo anterior, es posible atribuir y discernir una posible causa a la variación de la mineralogía:

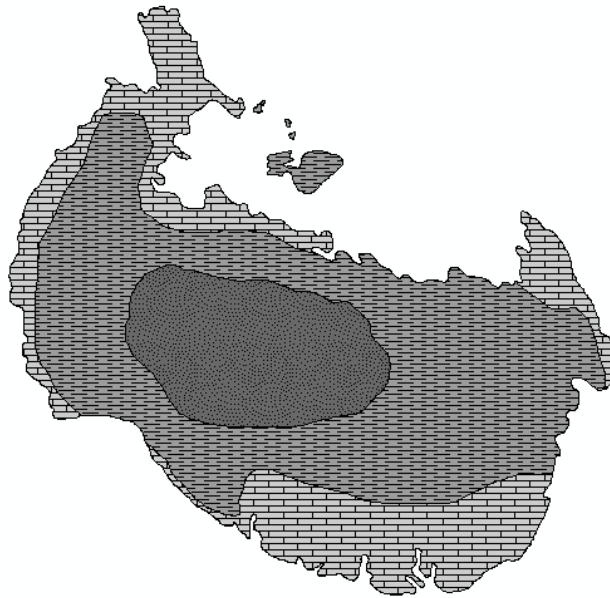
Sulfatos sódicos y halita (Thenardita - Halita respectivamente) tienden a desplazarse en una franja de orientación NNW-SSE en el sector adyacente de la laguna permanente. Esta franja en los periodos progresivos tiende a estar

remplazada por sulfatos cálcicos como Eugsterita y Yeso sin mucha presencia de Halita, este fenómeno estaría condicionado por dos factores:

- ✓ Bajas temperaturas lo que permite una baja tasa de evaporación y precipitación de fases de solubilidad intermedia.
- ✓ Las constantes precipitaciones en la cuenca del salar del Huasco permiten llevar las aguas desde pampa rinconada y pampa Sillillica hasta el sector de la laguna permanente, conforme precipitan las fases más insolubles el agua tiende a aumentar su salinidad, haciendo difícil la precipitación de halita, por ello es necesario verificar la salinidad de la laguna permanente en estas condiciones.

### **Comparación de la distribución de las salmueras con el modelo general de facies evaporíticas**

Como fue mencionado anteriormente el modelo general de facies evaporíticas sigue el orden de solubilidad de los grupos minerales, en el caso del salar del Huasco el modelo es coherente (Figura x), pero con ciertas morfologías propias al salar, ya que presenta un núcleo de corteza halítica, pero con morfologías estriadas y con orientación definida (WNW/ESE), el Grupo de los sulfatos no presenta una distribución definida, haciéndose presente en casi todos los sectores del salar, inclusive en los sectores periféricos (sector oeste y suroeste). Finalmente, el grupo de los carbonatos es más restringido, está limitado en las zonas periféricas y bordes del salar, sin grandes extensiones.



**Figura 39.** Modelo preliminar de distribución de facies evaporíticas en el salar del Huasco.

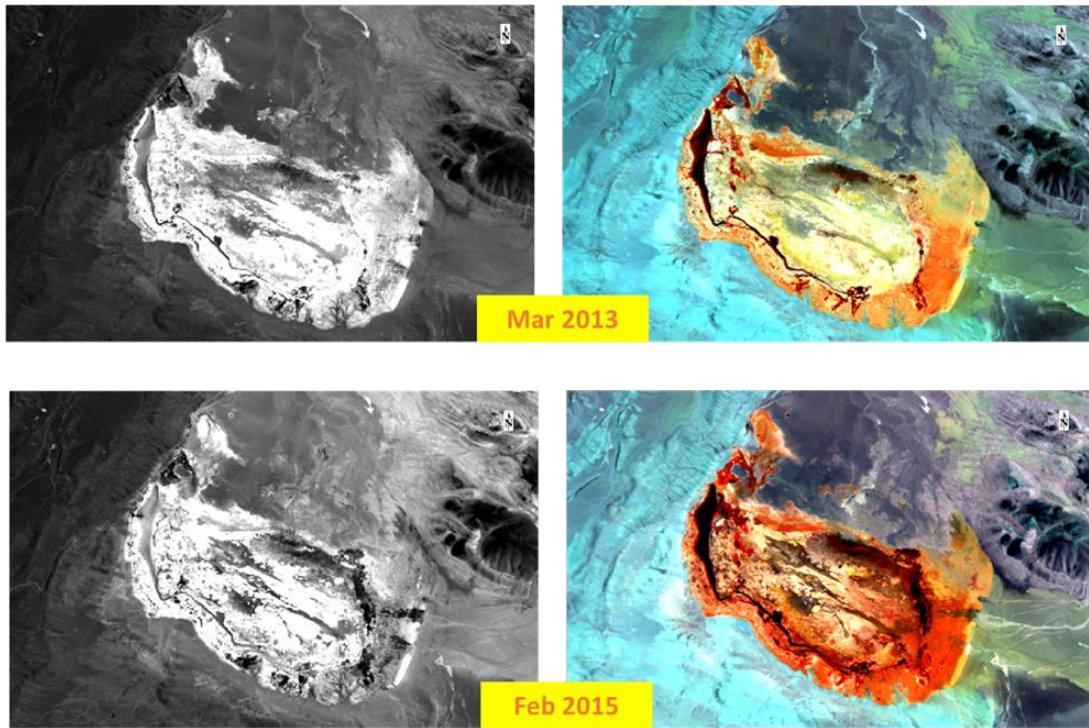
### **Precipitaciones de verano vs imagen satelital**

Por cuanto al análisis comparativo entre las imágenes satelitales espectrales versus los datos pluviométricos entregados por la Dirección General de Aguas (DGA), es posible determinar que el año 2013 presenta menores cantidades de tonalidades rojizas a diferencia del año 2015 el cual presenta mayor cantidad. Por el contrario, la cantidad de agua precipitada en dichos años correspondieron a valores cercanos a 140mm y 90mm respectivamente.

Dado lo anterior se determina una incongruencia de ambos datos ya que se espera que los meses más lluviosos presentan zonas con coloraciones más rojizas en la combinación de bandas 567 y menor cantidad de precipitación de sales (menos zonas blancas en la imagen en escala de grises 432) (Figura 40).

El parámetro que podrían dar respuesta a estas incongruencias podría estar atribuidos la temperatura, el cual condiciona la cantidad de precipitación de sales y condiciona la cantidad de aportes de aguas producto de los deshielo o congelamiento de nieves que estarían en las zonas más alta a la cuenca del salar del Huasco





**Figura 40.** Comparación de meses de verano para los años 2013 y 2015, meses con mayor cantidad de precipitaciones (mm) en los años analizados en este trabajo.

## 8. CONCLUSIONES

La variación sistemática de las evapofacies minerales dentro del salar permite corroborar en el salar del Huasco la dependencia de las costras salinas en relación con las variaciones climáticas, lo que determina que estas unidades presenten cambios estacionales, hecho que ya fue reportado por Vila (1975) a modo estándar para los depósitos salinos.

La comparación de combinación de bandas entre 567 y 564 para Landsat 8 OLI/TIRS permitió verificar la existencia de zonas húmedas (salmuera húmeda) generando nuevas variables para la combinación propuesta por Flahaut et al. (2017) para zonas húmedas en colores rojos fuertes. Estas nuevas variables permiten añadir tonos naranjos y rosados, que dependen del tipo de costra salina (composición). Así mismo, se concluye que existe variación espacio temporal de las salmueras, intensificándose en el borde este (sector de pampa rinconada), sector este de la laguna permanente, y sector central del salar del Huasco.

Siguiendo esta misma línea, a partir de la combinación de bandas del MNF *inverse* se determinó que no es posible identificar la distribución mineralógica en los meses de verano debido a que el salar se ve afectado en los meses de enero y febrero por lluvias tribuidas al invierno boliviano (periodos transgresivos), las imágenes de febrero (2014 - 2017) evidenciaron anterior, con la presencia de tonos rojizos, anaranjados y rosados. Por ello, se concluye que los periodos regresivos del salar del Huasco corresponden a los meses de invierno con notoria presencia de evaporitas, aumento de costra salina y buena visualización de la distribución de las evapofacies, a diferencia de los meses de verano donde el salar se ve afectado por lluvias, permitiendo así, un periodo transgresivo sin precipitaciones evaporíticas, bajo porcentaje de costra salina y poca visualización de los ensambles minerales.

La difracción de rayos X evidencio la existencia de minerales que no han sido reportados en el salar del Huasco, en el grupo de los sulfatos: Blöedita ( $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), Bukerita ( $\text{Na}_6(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)_2$ ), Eugsterita



( $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Singenita ( $\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), Aphthitalita ( $(\text{K},\text{Na})_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$ ), Potassium Alum ( $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$ ), Georgeyita ( $(\text{K}_2\text{Ca}_5(\text{SO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ ), y Hanksita ( $\text{Na}_{22}\text{K}(\text{SO}_4)_9(\text{CO}_3)_2\text{Cl}$ ), y en el grupo de boratos: Inyoita ( $(\text{CaB}_3\text{O}_3(\text{OH})_5 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$ ), Hilgardita ( $\text{Ca}_2\text{B}_5\text{O}_9\text{Cl} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), Hexahidrobórita ( $\text{Ca}(\text{B}(\text{OH})_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y Ameghinita ( $\text{Na}(\text{H}_4\text{B}_3\text{O}_7)$ ).

La utilización de polígonos de zonas de interés (ROIs) proporcionado por el software ENVI 5.4 y las firmas espectrales promedio, permitió identificar las evapofacies de sulfatos, carbonatos y halita. Los minerales que tuvieron mayor correlación corresponden a la evapofacie carbonatos (Calcita, Aragonito), evapofacie de sulfatos (Blöedita, Yeso, Thenardita) y evapofacie halítica (Halita).

A partir de la combinación de banda aplicada a las imágenes de MNF inverso de reflectancia normaliza, junto a la validación del muestreo realizado en terreno con DRX, el salar del Huasco presenta algunas similitudes con el modelo general de los salares propuesto por Vila (1975), debido a que se reconocieron las evapofacies de cloruro de sodio en el sector concéntrico con morfologías estriadas de orientación NNW-SSE, del mismo modo en las periferias de este zona se ratifica la presencia de sulfatos de Calcio, Sodio, Magnesio y Potasio en la mayoría de las zonas del salar, puesto a que esta evapofacie presenta solubilidad intermedia. Finalmente, la presencia de carbonatos es limitada, en sectores periféricos, precisamente en el sector norte y noreste junto a material detrítico.

## 9. VIII. REFERENCIAS

- Abrams, M., Hook, S., & Ramachadran, B. (2002).** *ASTER user handbook, version 2*. California: Jet Propulsion laboratory.
- Achurra, L. (2010).** *Estudio hidrogeoquímico sobre la interacción de aguas subterráneas profundas y someras en Pampa Lirima, Norte de Chile*. Tesis de Magister en Hidrogeología subterránea, Universidad Politécnica de Cataluña, Departament de Ingenieria del Terreno, Barcelona.
- Acosta, O. (2004).** *Impactos de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (Norte de Chile)*. Tesis de Magister, Departamento de ingenieria del Terreno, Universidad de Cataluña, Barcelona.
- Acosta, O., & Custodio, E. (2008).** *Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (Norte de Chile)*.
- Alonso, R. (2006).** Ambientes Evaporíticos Continentales de Argentina. *INSUGEO, Serie de Correlación Geológica*, p.155-170.
- Aguilar, H., Mora, R., & Vargas, C. (2014).** Atmospheric correction methodology for ASTER rapideye, spot 2 and Landsat 8 images with ENVI Flaash module Software. *Revista Geográfica de América Central* (no. 52), p. 29-590.
- Ariza, A. (2012).** *Handbook LANDSAT, Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. Bogotá - Colombia.
- Baker, M. (1977a).** Geochronology of Upper Tertiary volcanic activity in the Andes of North Chile. *Rundsch*, Vol.66(No. 2), 455-465 p.
- Baker, M. (1977b).** *Geochronology and volcanology of Upper Cenozoic volcanic activity in north Chile, and southwest Bolivia*. Ph.D. Tesis, Open Univ., Milton Keynes, Londres.
- Boardman, J., Kruse, F., & Green, R. (1995).** Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data.
- Bryant, R. (1999).** Application of AVHRR to Monitoring a Climatically Sensitive Playa. Case Study: Chott el Djerid Southern Tunisia. *Earth Surface Processes and Landforms*, p. 282-202.
- Cáceres, F., & Pirard, E. (2004).** *Síntesis Geológica y Cartografía Preliminar de los Minerales Evaporíticos del Salar de Coipasa Utilizando imágenes ASTER*. Bolivia: Centro de Investigaciones en Teledetección (CEINTEL-UTO).

- Camargo, R., Ponzoni, F., Queiroz, G., & Amaud, Y. (2002).** Characterization of the Salar de Uyuni for In-Orbit Satellite Calibration. *IEEE Transaction on Geoscience And Remote Sensing*, p. 1461-1468.
- Cawood, P., & Buchan, C. (2007).** Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly. *Earth-Science Reviews*, 82 (2), p. 217-256.
- Chapman, J., Rothery, D., Francis, P., & Pontual, A. (1989).** Remote sensing of evaporite mineral zonation in salt flats (salars). *International Journal of Remote Sensing*, p. 245-255.
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodriguez, M. (2007).** Tectono-stratigraphic evolution of the Andean orogen in Chile. (W. a. Gibbons, Ed.) *Special Publication*, p. 21-116.
- Chong, G. (1988).** The Cenozoic saline deposits of the Chilean Andes between 18 00' and 27 00' south latitude. The Southern Central Andes.
- Chong, G., Pueyo, J., & Demergasso, C. (2000).** Los yacimientos de boratos de Chile. *Revista geológica de Chile* (27), p. 99-119.
- Christensen, M., Pérez, G., & Montecinos, F. (1969).** *Cenozoic volcanism, deformation an denudation in northern Chile*. Universidad de California, Berkeley/Inst. Invest. Geol. (Chile). (Unpubl.).
- Clark, R. (1999).** Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. *Remote Sensing for the Earth Sciences*, Vo. 2, p. 2-58.
- COLLAHUASI, & DICTUC (2006).** *Estudio hidrogeologico conceptual y numerico del funcionamiento de la cuenca del salar de Coposa*. Informe Técnico, Santiago.
- Cortes, J. (2011).** *Evolución depositacional y tectónica neógena del Altiplano Chileno entre los 19 22'S y 19 42'S*. Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.
- DIHA, & PUC. (2009).** *Levantamiento Hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. Etapa II*. Informe Final Parte IV, S.I.T. N° 195, Dirección General de Aguas y Pontificia Universidad Catolica, Departamento de Ingenieria Hidraulica, Santiago.
- Ercilla, O., & Carrasco, R. (2012).** *Estudio bibliográfico sobre los salares del Norte Grande, Chile*. Santiago, Chile: SERNAGEOMIN.
- Farias, M., Charrier, R., Comte, D., & Martinod, J. (2005).** *Late Cenozoic deformation and uplift of the western flank of the Altiplano: Evidence from*

*the depositional, tectonic, and geomorphologic evolution and shallow seismic activity (northern Chile at 19°20'S).*

- Flahaut, J., Martinot, M., Bishop, J., Davies, G., & Potts, N. (2016).** Remote sensing and in situ mineralogic survey of the Chilean salars: An analog to Mars evaporate deposits? *ELSEVIER Icarus*, p. 1-22.
- Flores, V. (2010).** *Modelo Conceptual Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Coposa*. Tesis de Magister, Pontificia universidad Católica de Chile, Escuela de ingeniería, Santiago de Chile.
- Gajardo, A., & Carrasco, A. (2006).** *Depositos salinos de tipo salar en la I Región de Tarapacá*. Santiago, Chile: SERNAGEOMIN.
- Gallardo, F. (2015).** *Geología y estructura de la precordillera altiplanica entre 19°45'S Y 20°00'S, Region de Tarapacá, Chile*. Tesis de pregrado y Magister, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.
- Galli, C. (1957).** Las formaciones geológicas en el borde occidental de la Puna de Atacama, sector de Pica, Tarapacá. 56, p. 14-26.
- Galli, C. (1967).** Pediplain in Northern Chile and the Andean Uplif. 158, p. 652-655.
- Garcia, M., Gardeweg, M., Clavero, J., & Hérail, G. (2004).** *Hoja Arica: Region de Tarapacá, escala 1:250.000*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Garcia, M., Riquelme, R., Farias, M., Hérail, G., & Charrier, R. (2011).** Late Miocene–Holocene canyon incision in the western Altiplano, northern Chile: *Journal of the Geological Society*, Vol. 168, p. 1047-1060.
- Gardeweg, M., & Sellés, D. (2015).** Estartigrafía y evolución estructural del área Collacagua-Rinconada, alta Cordillera de Iquique, 20°00'-20°20'S- Región de Tarapacá. *Congreso Geológico Chileno*, p. 718-721.
- Gonzaga Aguilar, C. (2014).** *Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador*. Tesis de Magister, La Plata.
- Green, A., Berman, M., Switzer, M., & Craig, M. (1988).** A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, p. 65-74.
- Grilli, A., & Vidal, F. (1986).** *Evaporación desde salares: metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación en las Regiones I y II*.

- Hardie, L., & Eugster, H. (1970).** The evolution of closed-basin brines. *Mineralogical Society of America Special Paper*, p. 272-290.
- Harshbarger, E. M. (1985).** Groundwater development from salar basins in the arid andean highlands of northern, Chile. *IV Congreso Geológico Chileno*.
- Herrera, V., De Gregori, I., & Pinochet, H. (2009).** Assessment of trace elements and mobility of arsenic and manganese in lagoon sediments of the salars of Huasco and Coposa, Chilean Altiplano. *Journal of the Chilean Chemical Society*, p. 282-288.
- Huete, C., Maksaev, V., & Moscoso, R. (1977).** Antecedentes geocronológicos de rocas intrusivas y volcánicas en la Cordillera de los Andes comprendida entre la Sierra Moreno y el Río Loa y los 21° y 22° latitud sur, II Región, Chile. *Revista Geológica de Chile*, No. 4, p. 25-41.
- Iturra, N. (2016).** Hidrogeología del sistema hídrico Parinacota-Cotacotani, altiplano de la XV Región de Arica y Parinacota. Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.
- Jones, B., & Deocampo, D. (2002).** Geochemistry of saline lakes. *Treatise on geochemistry*, 5, p. 605.
- Kargi, H. (2007).** Principal components analysis for borate mapping. *International Journal of Remote Sensing*, p. 1805-1817.
- Kendall, A. C. (1992).** *Evaporites. In Facies Models, Response to sea level changes*. Canadá: Walker R.G. & James N.P. eds. Geological Association of Canadá.
- Kruse, F. (1996).** Geologic mapping using combined analysis of Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) and SIR-C/X-SAR data. *SPIE (The International Society for Optical Engineering)*, Vo. 2819, p. 24-25.
- Lagos, L. (2016).** Hidrogeoquímica de fuentes termales en ambientes salinos relacionados a salares en el norte de Chile. Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.
- Loewy, S. L., Connelly, J., & Dalziel, I. (2004).** An orphaned basement block: The Arequipa-Antofalla Basement of the central Andean margin of South America. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 116 (no. 1-2), p. 171-187.
- Montgomery, E., & Hashbarger, J. (1985).** Groundwater development from salar basins in the arid Andean highlands of northern Chile.

- Munizaga, F., Maksaev, V., Fanning, C., Giglio, S., Yaxley, G., & Tassinari, C. (2008).** Late Paleozoic–Early Triassic magmatism on the western margin of Gondwana: Collahuasi area, Northern Chile. *Gondwana Research*, 12 (2), 407-427.
- Navarrete, C. (2012).** *Análisis de los ambientes sedimentarios y principales factores de control, Nor-Este del salar de Coposa, Norte de Chile*. Memoria de Título Pregrado, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.
- Neville, P., Coward, R., Watson, R., Inglis, M., & Morain, S. (2000).** The Application of TM Imagery and GIs Data in the Assessment of Arid Lands Water and Land Resources in West Texas. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, p. 1272-1279.
- Pérez, D., D'odorico, P., & Godeas, M. (2010).** Reconocimiento de alteración hidrotermal con el sensor Aster, en el curso medio del río Santa Cruz (21°40's), provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Vo. 66(4), p. 622 - 622.
- Ponzoni, J. (2000).** Evaluation of the "Salar de Uyuni/Bolivia" As Radiometric Calibration Test Site For Satellite Sensors. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, p. 222-227.
- Posadas, A., Quiroz, R., Zorogastúa, P., & León-Velarde, C. (2005).** Multifractal Characterization of the Spatial Distribution of Ulexite in a Bolivian Salt Flat. *International Journal of Remote Sensing*, p. 615–627.
- Ramos, V. (2008).** The basement of the Central Andes: the Arequipa and related terranes. *Rev. Earth Planet. Sci*, vol. 26, p. 289-224.
- Richter-Bernburg, G. (1972).** Sedimentological Problems of Saline Deposits. *Geology of Saline Deposits, UNESCO*, p. 22-29.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (1999).** *Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas I, II y III Regiones, Chile*. Síntesis, convenio de colaboración DGA-UCN-ORSTOM.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (2002).** The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews*, 62, p. 249-292.
- Rojas, B., & Salazar, C. (2010).** *Propuesta metodológica para estimación de recarga en cuencas Altiplánicas y de vertiente Pacífico*. Minuta Técnica.

- Sabins, F., & Miller, R. (1994).** Resource assessment - Salar de Uyuni and vicinity. *Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Vo. 1*, p. I-92.
- Sayes, J. (1978).** *Cuadrangulos Collacagua y laguna del Huasco, provincia de Iquique I Región*. 1 mapa escala 1:100.000, Instituto de Investigaciones geologicas (IIG).
- Serkan Öztan, N., & Lütfi Süzen, M. (2011).** Mapping evaporate minerals by ASTER. *International Journal of Remote Sensing*, 22(6), p. 1651–1672.
- Silva, C., Yañez, E., Vargas, V., Aguilera, J., & Lastra, J. (2016).** *Manejo e interpretación de imágenes satelitales de alta resolución aplicadas a las labores de exploración del borde costero y cuerpos de agua donde se desarrolle la actividad de Acuicultura (Fase II)*. Universidad Catolica de Valparaíso, Valparaíso.
- Taucare, M. (2015).** *Hidrogeología y aplicación del método TEM para el reconocimiento de acuíferos en la quebrada de Camiña, Región de Tarapacá, Chile*. Tesis de Pregrado, Universidad Católica del Norte, Departamento de Geología, Antofagasta.
- Tröger, U., & Gerstner, D. (2004).** *Estudio de Investigación de la Situación Hidrogeológica en la Formación Altos de Pica*. Informe Técnico de Asesoría Experta, Convenio DGA-CONADI.
- Vega, M., Pueyo, J., & Chong, G. (1997).** Asociaciones Minerales y Evolución Paragenética de los Yacimientos de Nitratos y yodo de la Zona de Zapiga-Dolores (I Región de Tarapacá). *VII Congreso Geológico Chileno*, p. 1565-1569.
- Vergara, H. (1978b).** *Cuadrángulo Ujina. Región de Tarapacá*. Instituto de Invetigaciones Geológicas, Chile.
- Vergara, H., & Thomas, A. (1984).** *Carta Geológica de Chile N° 59, Escala 1:250.000. Hoja Collacagua. Región de Tarapacá*. Servicio Nacional de Geologia y Minería, Santiago.
- Vila G, T. (1975).** Geología de los depositos salinos Andinos, Chile. *Revista Geológica de Chile*(N. 2), p. 41-55.
- Villemur, J. (1962).** Caya and Copaquire Quadrangles. (E. Universitaria, Ed.) *Geological and mineral Survey of Northern Chile*, 18 p.

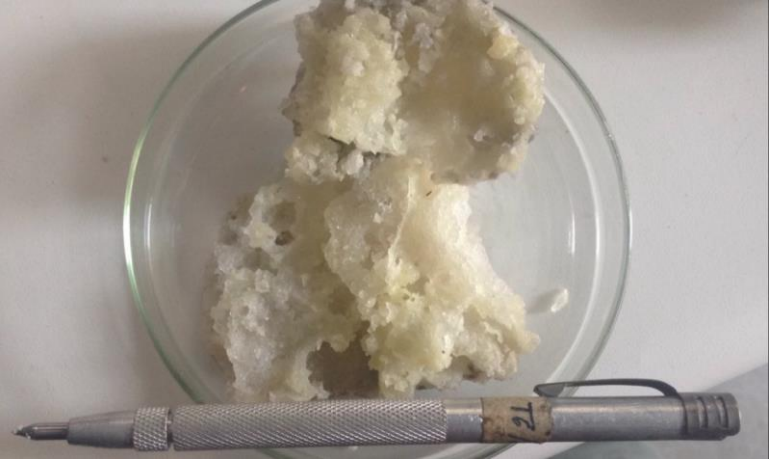




- Vinante, D., & Alonso, R. (2006).** Evapofacies del Salar del Hombre Muerto, Puna Argentina: Distribución y Genesis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61, p. 286-297.
- Ware, G., & Münchmeyer, C. (1981).** *Progress Report on exploration of Collaguasi District.* Cía. Exploradora Doña Inés, Ltda. Unpublished private report.
- Warren, J. (2016).** *Evaporites.* Bangkok, Thailand: W.M. White (editorial).
- White, K., & Drake, N. (1992).** Mapping the distribution and abundance of gypsum in south-central Tunisia from Landsat Thematic Mapper data. *Zeitschrift für Geomorphologie*, p. 209-225.
- Yamaguchi, Y., Kahle, B., Tsu, H., Kawakami, T., & Pniel, M. (1998).** Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, Vol. 26 (No. 4).

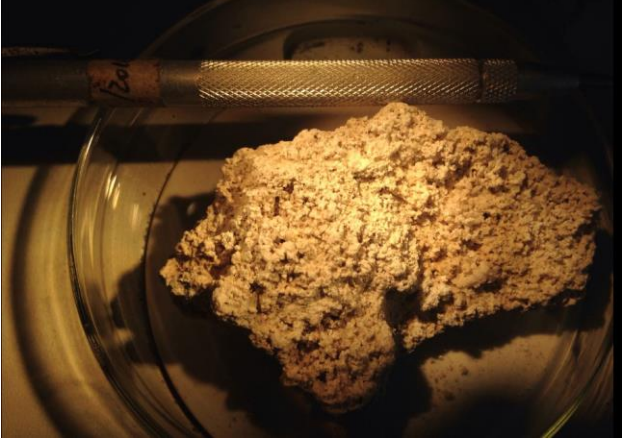
## **10. ANEXO**


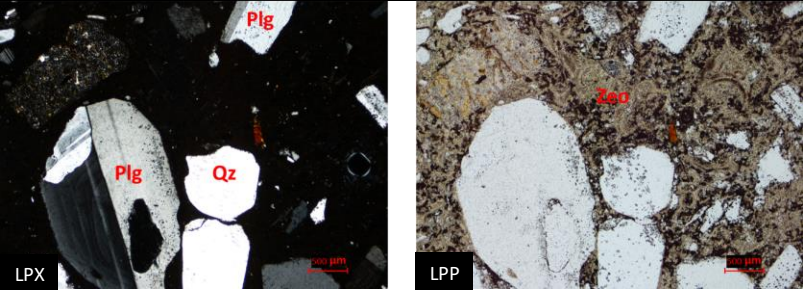

### **9.1 ANEXO A**


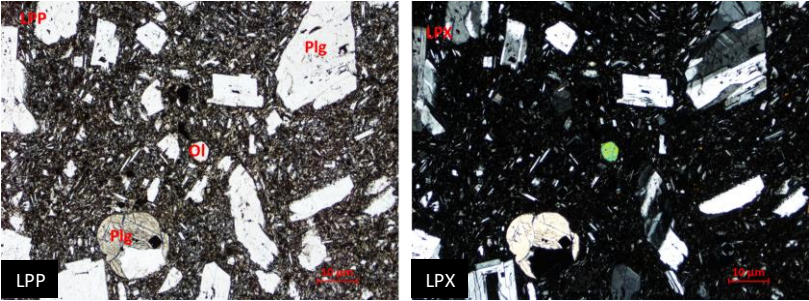
*Descripción de muestras litológicas, costra salina y mapa geológico 1:50.000*

Muestra	HU-01 (UTM WGS84: 7758098/512221)	Fotografía
Descripción macroscópica	<p><b>A simple vista:</b> Muestra de color banco con tonos amarillentos, presenta aspecto hojoso con cavidades abruptas y angulares. <b>En lupa binocular:</b> Presenta masas compactas de dureza 4-5 en escala de Mohs, el habito de la muestra en su mayoría es masivo y en pequeñas proporciones habito cubico típico de la halita. En cuanto a los tonos amarillentos, presenta mal olor el cual se intensifica al aplicar, HCl. Azufre.</p>	
Muestra	HU-05 (UTM WGS84: 7760543/513725)	Fotografía
Descripción macroscópica	<p><b>A simple vista:</b> Muestra de color pardo blanquecino, de textura masiva y porosa. <b>En lupa binocular:</b> Presenta en su mayoría una masa compacta de color blanco polvoriento en la superficie, la cual reacciona con HCl, en algunas zonas la muestra presenta fragmentos de cuarzo y feldespato potásico, este último con alteración incipiente de arcillas, así también presenta pequeños cristales de yeso (&lt;2mm) con hábito tabular. Síntesis: Cuarzo, Feld-K, yeso y Calcita.</p>	


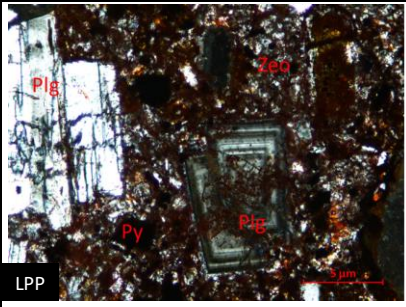
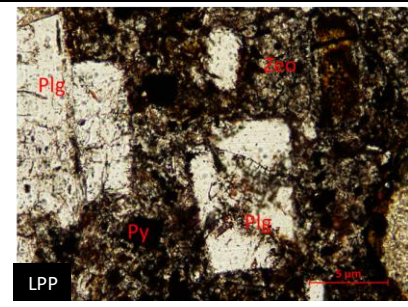
Muestra	HU-07 (UTM WGS84: 7756685/513699)	Fotografía
Descripción macroscópica	<p><b>A simple vista:</b> Muestra de color blanco, de poca cohesión polvorienta, presenta cumulus de hasta 3 cm. <b>En lupa binocular:</b> exhibe morfologías glubulares y masivas de igual proporción, la dureza de la muestra es de 1 en escala de Mohs, su reaccion al HCl es muy leve, al final de la aplicación el mineral absorve bruscamente el ácido por lo que se infiere que es un mineral anhidro</p>	

Muestra	HU-09 (UTM WGS84: 7756580/514191)	Fotografía
Descripción macroscópica	<p><b>A simple vista:</b> Muestra de color blanco parduzco, aspecto masivo y granular. <b>En lupa binocular:</b> se pueden distinguir masas compactas, reñiformes de cristales con habito tabular, masivo y granular. Estas masas presentan dureza de 2-3 en la escala de mohs, no eferce al HC, a excepción de algunas cavidades entre los minerales. Aparentemente, el mineral de masas compactas presenta las características de Thenardita en asociación con yeso.</p>	

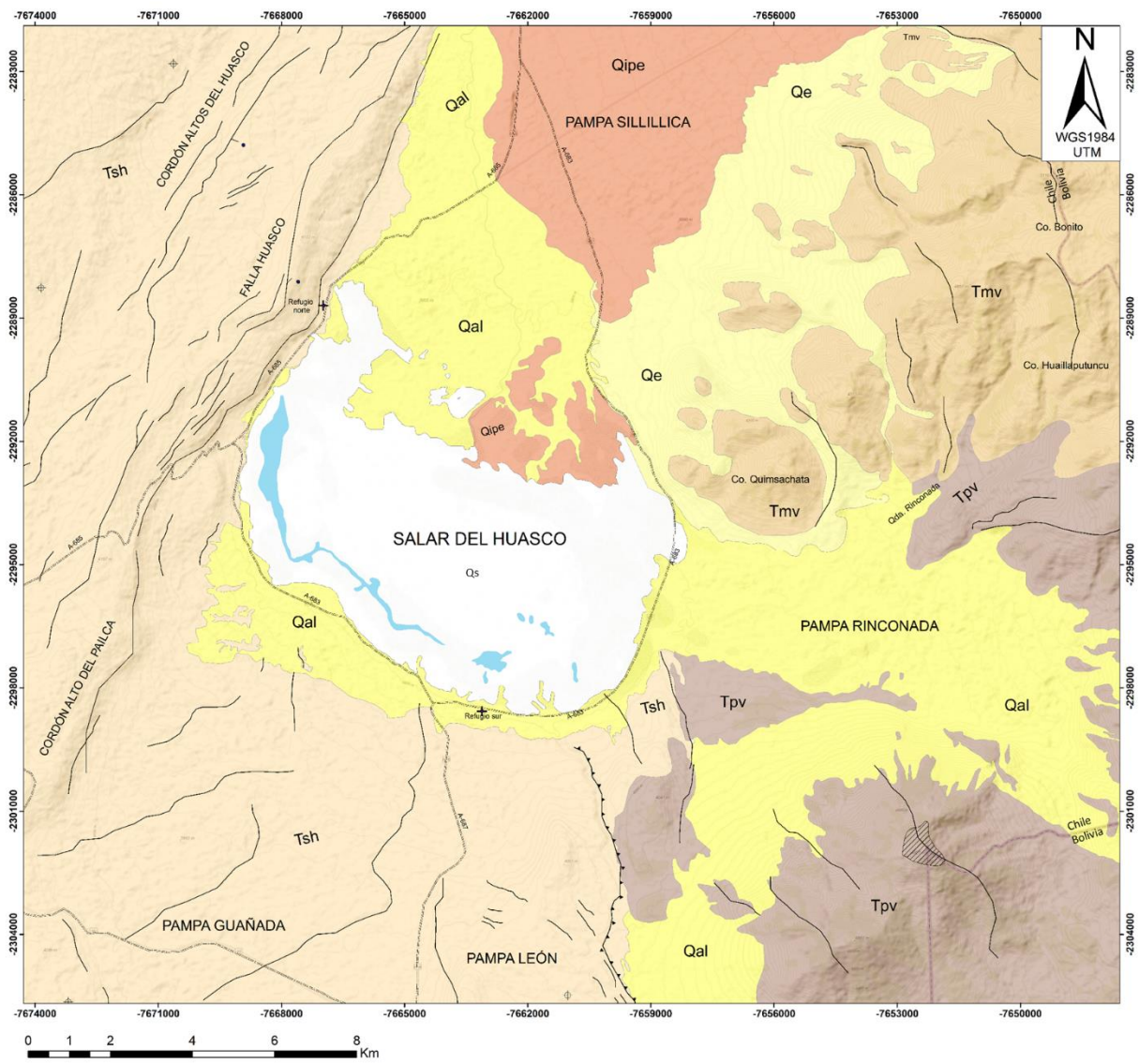
Muestra	HU-10 (UTM WGS84: 7756772/510465)	Fotografía
Descripción	<p><b>En lupa binocular:</b> Muestra de color pardo blanquesina, aparentemente corresponde a una toba vitrea, presenta fragmentos de hasta 5mm de ceniza y cristales (mayormente cuarzo anhedral, biotita moderada de clorita y fragmentos líticos de color café negruzcos los cuales no superan los 3mm). Con respecto a la masa fundamental no se distinguen cristales a simple vista, esta es de color blanca y aparentemente tiene vidrio con fragmentos pequeños de cuarzo.</p>	
	<p><b>Al microscopio:</b> Presenta fenocristales de Hornblendas con alteración incipiente y fragmentadas, cristales plagioclasa con zonación sin alteración, cristales subhedrales y fragmentados de ortoclasa sin alteración, cristales de cuarzo con embahamiento y cristales de biotita subhedral. la muestra presenta fragmentos líticos andesíticos, vidrio, cristales opacos (pirita) matriz rella de óxidos y zeolitas.</p>	
Muestra	HU-11 (UTM WGS84: 7760240/513993)	Fotografía
Descripción macroscópica	<p><b>En lupa binocular:</b> Muestra de cobertura aluvial: En lupa binocular corresponde a clastos de diferentes composiciones y diversos tamaños entre 2mm hasta 3cm, presentan en su mayoría buen redondeamiento y baja esfericidad, la composición la integran cristales de cuarzo de color blanco y verdosos, fragmentos de andesitas con plagioclasas alteradas a arcillas, tobas rosadas con fragmentos líticos, tobas cristalinas con piroxenos y biotitas y fragmentos bien compactados de ceniza. La muestra no reacciona con HCl.</p>	

Muestra	HU-12 (UTM WGS84: 7755655/510465)	Fotografía
Descripción	<p><b>En lupa Binocular:</b> Muestra de color negra grisácea, aparentemente corresponde a una andesita, presenta cristales de plagioclasa subhedrales y anhedrales de 3-5mm con atracción moderada de arcillas, la masa fundamental es de color negra con presencia de biotitas con alteración moderada.</p>	
	<p><b>Al microscopio:</b> La muestra presenta fenocristales de plagioclasa con alteración incipiente, euhedrales-subhedrales, cristales clinopiroxeno con alteración moderada, olivino con fracturamiento intenso y alteración moderada, cristales de biotita sin aletarcipon. La masa fundamental presenta plagiosas y zirrones diistinguibles por su alto relieve.</p>	



Muestra	HU-16 (UTM WGS84: 7750432/520190)	Fotografía	
Descripción	<p><b>En lupa binocular:</b> Muestra de color pardo rosado con tonos verdosos, esta ultima posiblemente productos de alteración (clorita), aparentemente corresponde a una toba vitrea/litica, con divesos fragmentos: Cristales de cuarzo (abundante) de bordes redondeados , cristales de plagioclasa anhedral y subhedral con alteración pervasiva de arcillas, biotita con alteración debil (2 mm) fragmentos liticos (3 cm) de color pardo y negros ( se reconocen fragmentos de andesita), la masa fundamental no reacciona con HCl, esta es de color pardo rojiza (mayoritariamente),</p>		
	<p>Otros minerales observados: Hematita granular dineminada</p> <p><b>Al microscopio:</b> La muestra presenta fenocristales de plagioclasas con zonación, altaracion incipiente y textura esqueletal y embahiamiento, fenocristales de hornblenda con alteracion incipiente, cristales de cuarzo con embahiamiento, biotita con alteración incipiente con inclusiones de cristales de apatita. La muestra presenta liticos adensiticos de hasta 1 cm, La matriz presenta zeolitas rellenoando cavidades.</p>		





# MAPA GEOLÓGICO SALAR DEL HUASCO 1:50.000

## Leyenda

CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	<div>Qe</div> Depósitos aluviales, eólicos de ceniza y lapilli	<div>Qs</div> Depósitos salinos
		PLEISTOCENO	<div>Qe</div> Depósitos eólicos	
	PIOCENO	SUPERIOR	<div>Qal</div> Depósitos aluviales	
			<div>Tpv</div> Estrato-volcanes andesíticos y dacíticos Moderadamente erosionados (Plioceno).	
MIOCENO	MIOCENO	MEDIO	<div>Tmv</div> Estrato-volcanes andesíticos y dacíticos intensamente erosionados (Mioceno medio – Plioceno).	
		INFERIOR	<div>Tsh</div> Ignimbrita Huasco (Mioceno medio - Superior) Ignimbritas riolíticas y dacíticas de color gris y rosadas fuertemente fracturadas, tobas Vitreas, depósitos de caída tamaño ceniza.	

## Simbología

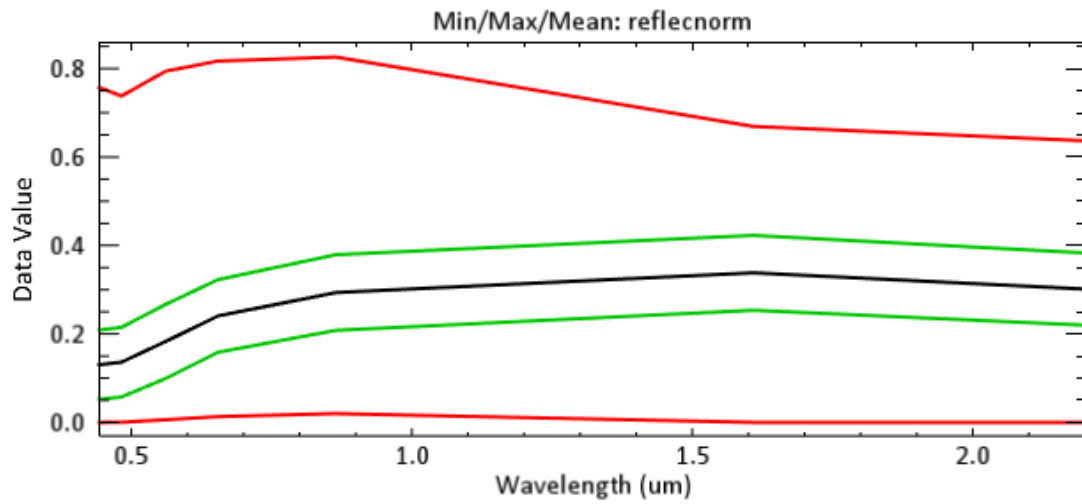
- Estratos subhorizontales
- Falla normal, símbolo indica bloque hundido
- Lineamiento fotogeológico
- Refugio
- Limite internacional
- Ruta
- Caldera volcánica



## **9.2 ANEXO B**

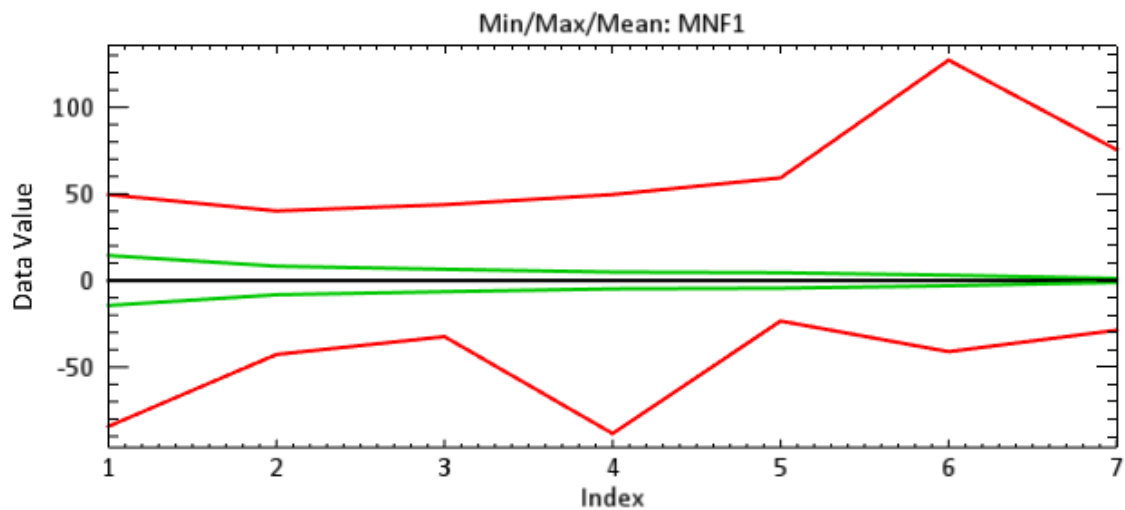
*Datos estadísticos de bandas, análisis espacio temporal*

## REFLECTANCIA NORMALIZADA marzo | 2014



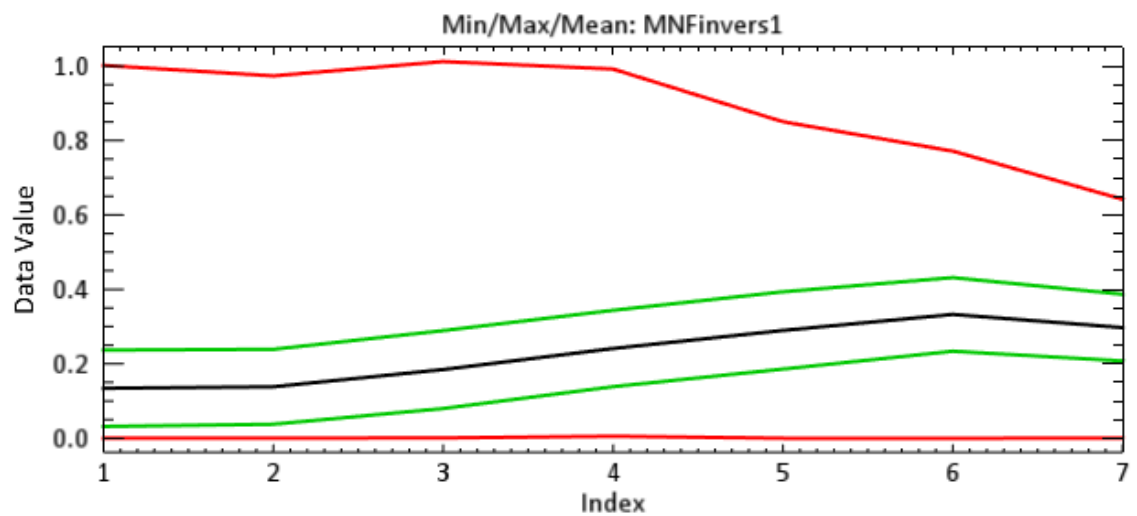
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.000000	0.757300	0.130403	0.078288
Band 2	0.000300	0.737900	0.136113	0.078693
Band 3	0.005900	0.794000	0.182972	0.083781
Band 4	0.013000	0.816800	0.240608	0.082097
Band 5	0.019800	0.826000	0.293527	0.085494
Band 6	0.000000	0.669100	0.338098	0.084680
Band 7	0.000000	0.636600	0.301345	0.081652

## MNF marzo | 2014



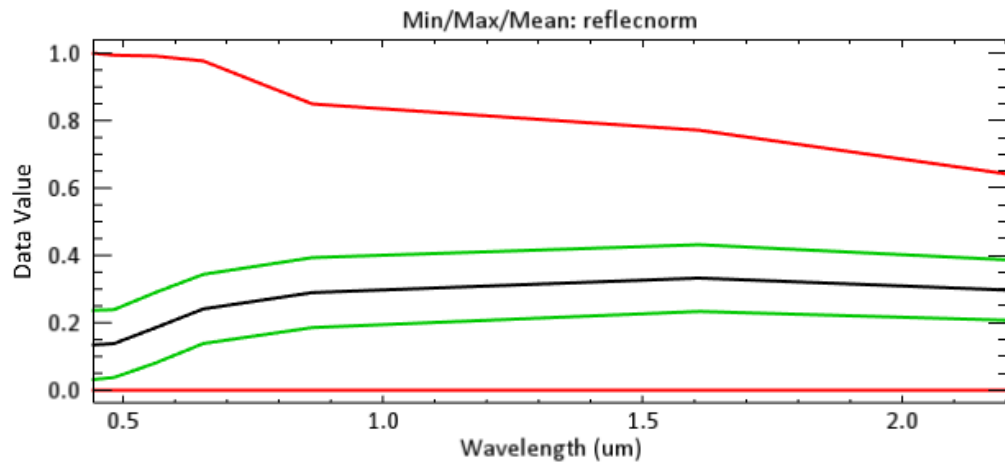
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	-84.208.626	49.561.535	0.000000	14.435.405
Band 2	-42.716.019	40.146.004	0.000000	8.242.800
Band 3	-32.430.511	43.758.347	0.000000	6.469.165
Band 4	-88.364.288	49.585.934	-0.000000	4.830.759
Band 5	-23.407.351	59.250.328	0.000000	4.451.220
Band 6	-41.094.490	127.221.916	-0.000000	3.054.554
Band 7	-28.706.083	75.459.656	-0.000000	1.164.054

## MNF INVERSE marzo | 2014



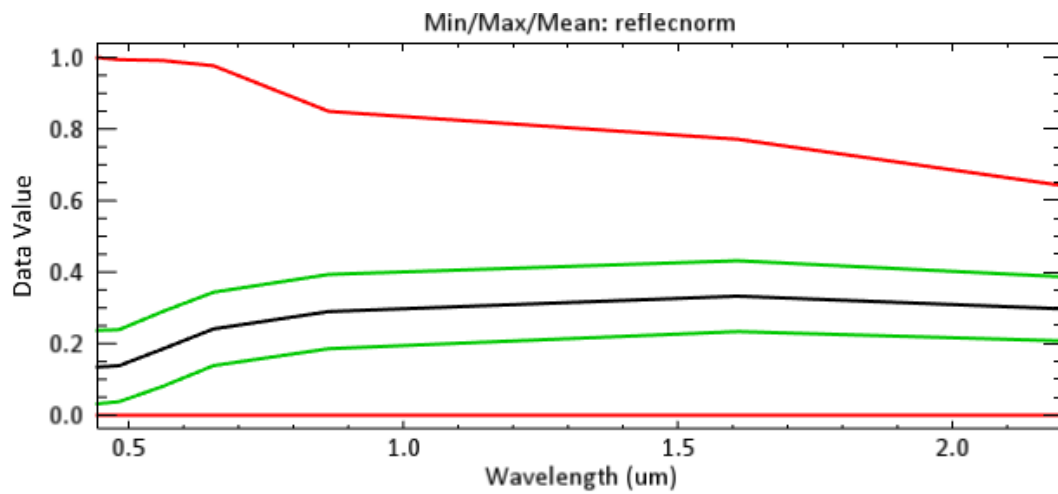
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.002797	0.756021	0.130403	0.078281
Band 2	0.006445	0.735873	0.136113	0.078677
Band 3	0.017152	0.763638	0.182972	0.083757
Band 4	0.027696	0.804710	0.240609	0.082086
Band 5	0.022770	0.820287	0.293529	0.085487
Band 6	0.000090	0.669864	0.338101	0.084671
Band 7	0.001668	0.637124	0.301348	0.081645

## REFLECTANCIA NORMALIZADA Agosto | 2014



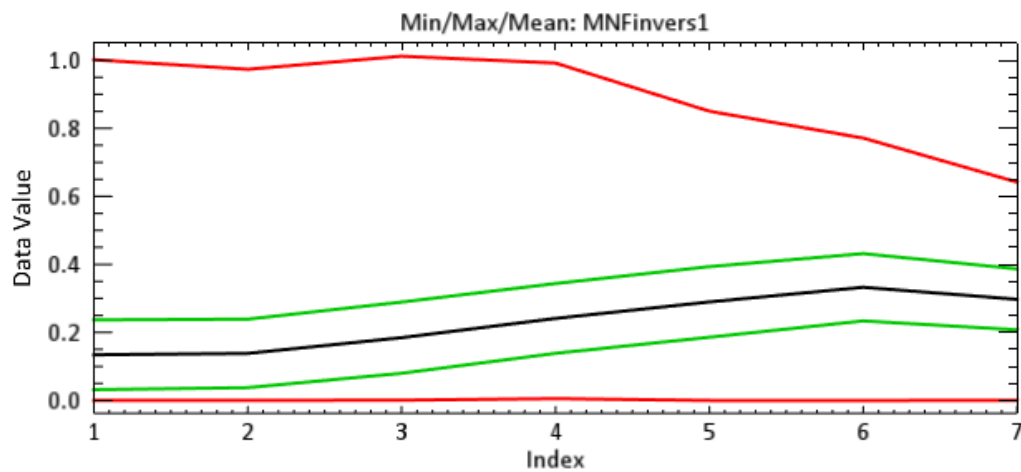
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.000000	1.000.000	0.134295	0.102580
Band 2	0.000000	0.994000	0.138260	0.100679
Band 3	0.000000	0.991700	0.184532	0.104684
Band 4	0.000000	0.976800	0.241099	0.102623
Band 5	0.000000	0.849300	0.289555	0.103862
Band 6	0.000000	0.771400	0.332635	0.099039
Band 7	0.000000	0.641800	0.297200	0.089659

## MNF Agosto | 2014



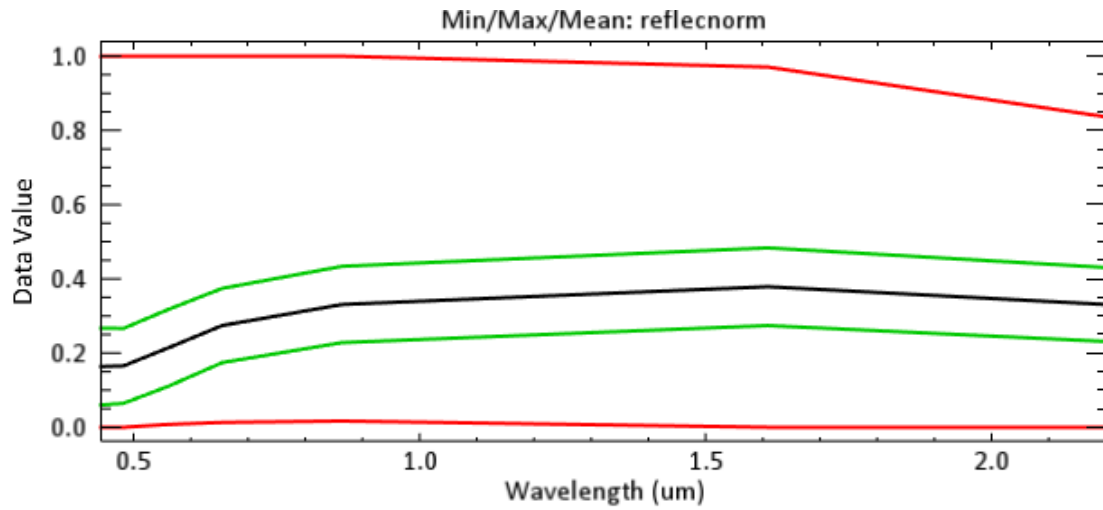
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.000000	1.000.000	0.134295	0.102580
Band 2	0.000000	0.994000	0.138260	0.100679
Band 3	0.000000	0.991700	0.184532	0.104684
Band 4	0.000000	0.976800	0.241099	0.102623
Band 5	0.000000	0.849300	0.289555	0.103862
Band 6	0.000000	0.771400	0.332635	0.099039
Band 7	0.000000	0.641800	0.297200	0.089659

## MNF INVERSE Agosto | 2014



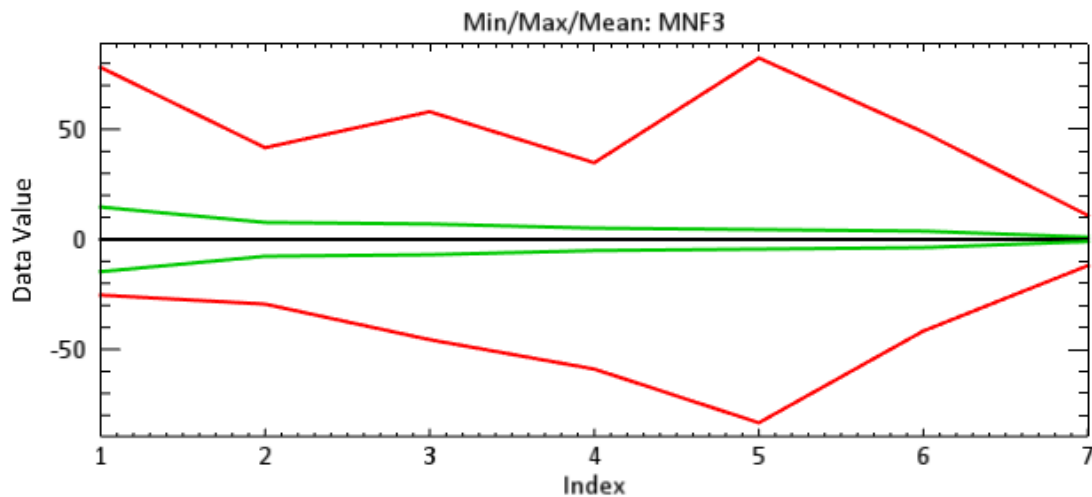
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.000227	1.001.740	0.134305	0.102570
Band 2	0.000345	0.973482	0.138269	0.100658
Band 3	0.000832	1.011.968	0.184536	0.104642
Band 4	0.005402	0.991784	0.241118	0.102589
Band 5	0.000003	0.850293	0.289603	0.103794
Band 6	0.000081	0.771335	0.332693	0.098944
Band 7	0.000186	0.641781	0.297251	0.089577

## REFLECTANCIA NORMALIZADA Febrero | 2014



Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.000000	1.000.000	0.163610	0.103649
Band 2	0.000000	1.000.000	0.165578	0.100926
Band 3	0.007700	1.000.000	0.214404	0.103579
Band 4	0.013000	1.000.000	0.274106	0.100016
Band 5	0.016800	1.000.000	0.330927	0.102856
Band 6	0.000000	0.970700	0.378761	0.104668
Band 7	0.000000	0.836300	0.330786	0.099675

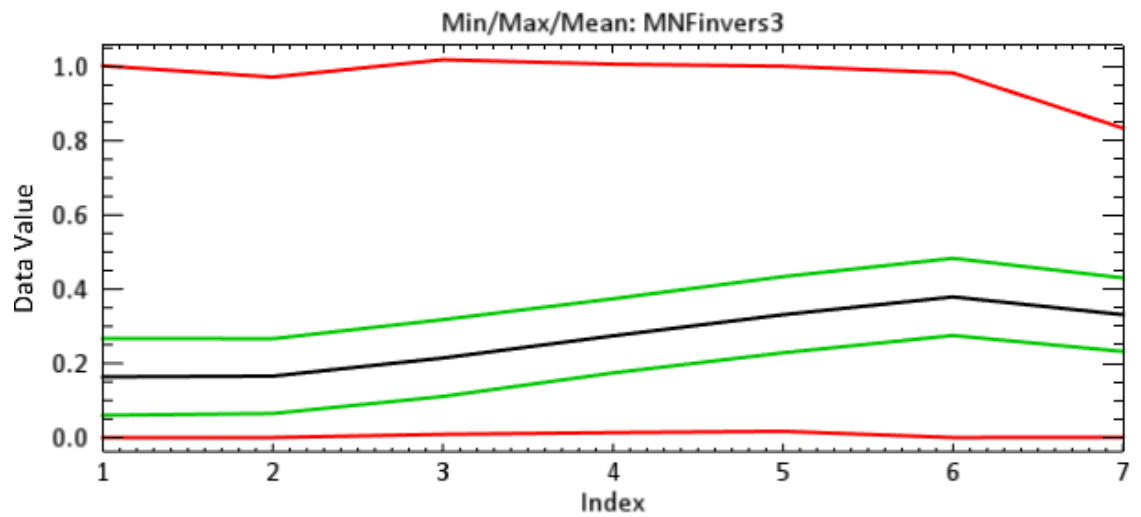
## MNF Febrero | 2014





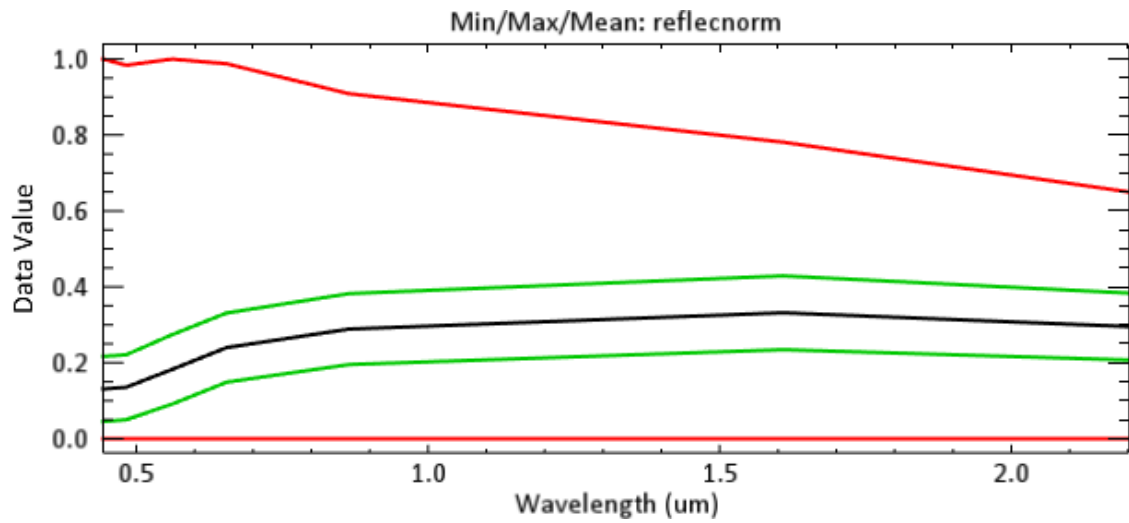
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.000000	1.000.000	0.163610	0.103649
Band 2	0.000000	1.000.000	0.165578	0.100926
Band 3	0.007700	1.000.000	0.214404	0.103579
Band 4	0.013000	1.000.000	0.274106	0.100016
Band 5	0.016800	1.000.000	0.330927	0.102856
Band 6	0.000000	0.970700	0.378761	0.104668
Band 7	0.000000	0.836300	0.330786	0.099675

## MNF INVERSE Febrero | 2014



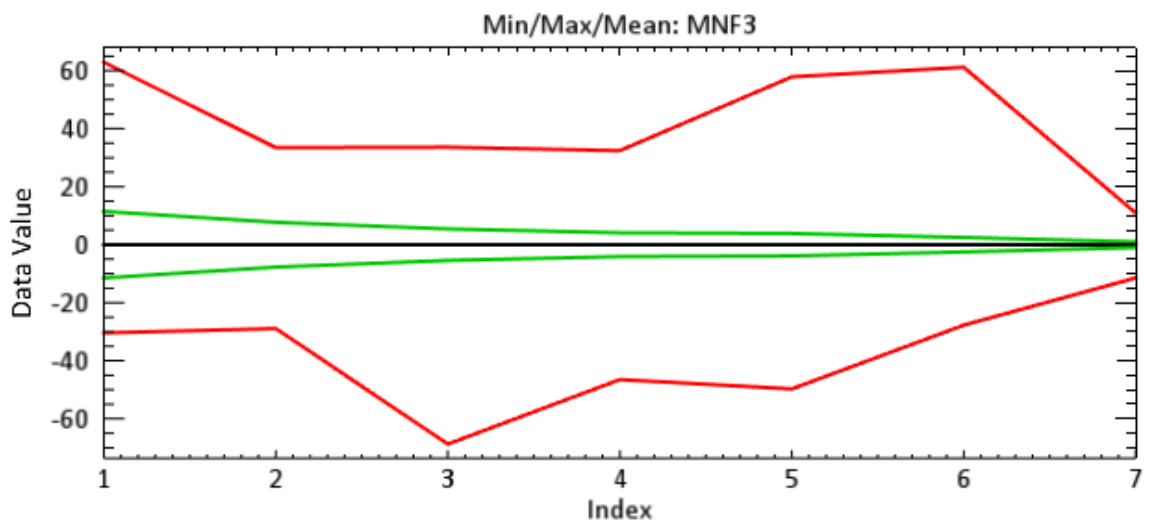
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.000030	1.002.102	0.163613	0.103625
Band 2	0.000026	0.971574	0.165555	0.100874
Band 3	0.008678	1.018.472	0.214350	0.103513
Band 4	0.013339	1.006.462	0.274105	0.099973
Band 5	0.016771	1.000.967	0.331112	0.102661
Band 6	0.000005	0.982811	0.379110	0.104038
Band 7	0.000471	0.833747	0.331089	0.099177

## REFLECTANCIA NORMALIZADA Agosto | 2014



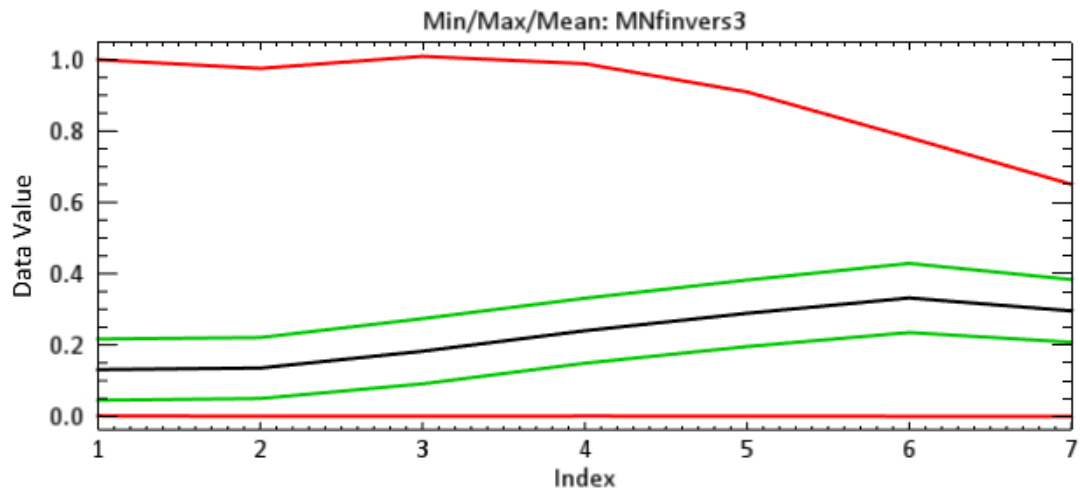
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.000000	1.000.000	0.130976	0.085862
Band 2	0.000000	0.983800	0.135443	0.085519
Band 3	0.000000	1.000.000	0.182512	0.091501
Band 4	0.000000	0.987700	0.239919	0.091102
Band 5	0.000000	0.908800	0.288698	0.093432
Band 6	0.000000	0.781000	0.331694	0.097228
Band 7	0.000000	0.650100	0.295405	0.088106

## MNF Agosto | 2014



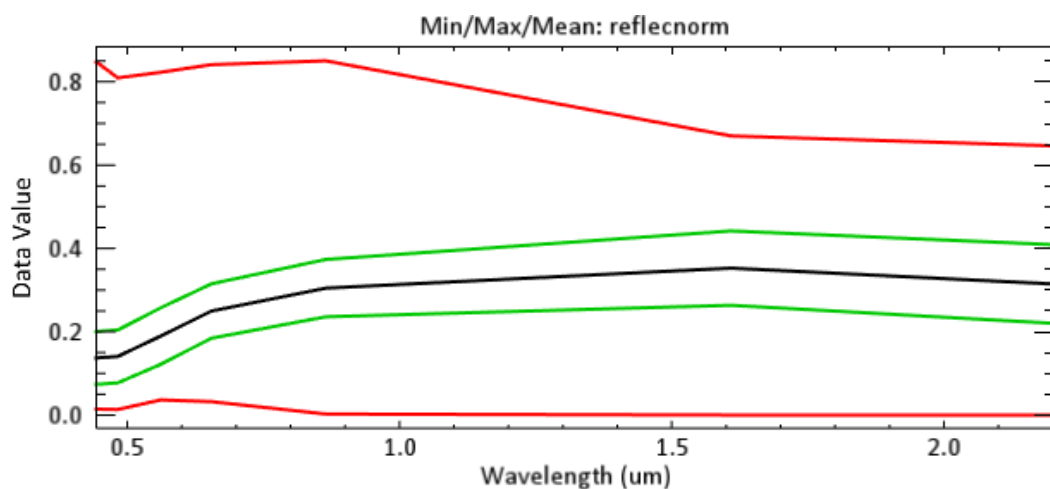
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	-30.407.724	62.894.485	-0.000000	11.474.822
Band 2	-28.911.139	33.458.942	-0.000000	7.714.556
Band 3	-68.728.844	33.614.513	-0.000000	5.432.367
Band 4	-46.498.363	32.407.032	-0.000000	4.101.253
Band 5	-49.714.142	57.880.527	-0.000000	3.874.035
Band 6	-27.728.033	61.157.890	0.000000	2.496.132
Band 7	-11.438.676	10.909.061	-0.000000	1.003.253

## MNF INVERSE Agosto | 2014



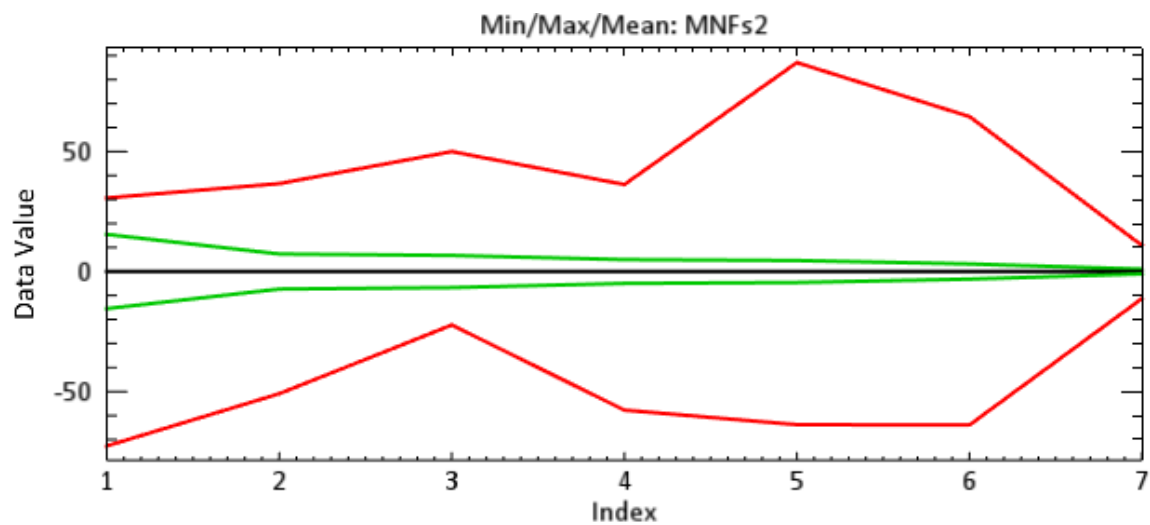
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.001329	0.999813	0.130941	0.085837
Band 2	0.000194	0.975560	0.135399	0.085476
Band 3	0.000172	1.009.379	0.182456	0.091441
Band 4	0.000732	0.988664	0.239920	0.091084
Band 5	0.000512	0.909457	0.288843	0.093227
Band 6	0.000003	0.781399	0.331879	0.096912
Band 7	0.000029	0.650455	0.295569	0.087832

## REFLECTANCIA NORMALIZADA Febrero | 2015



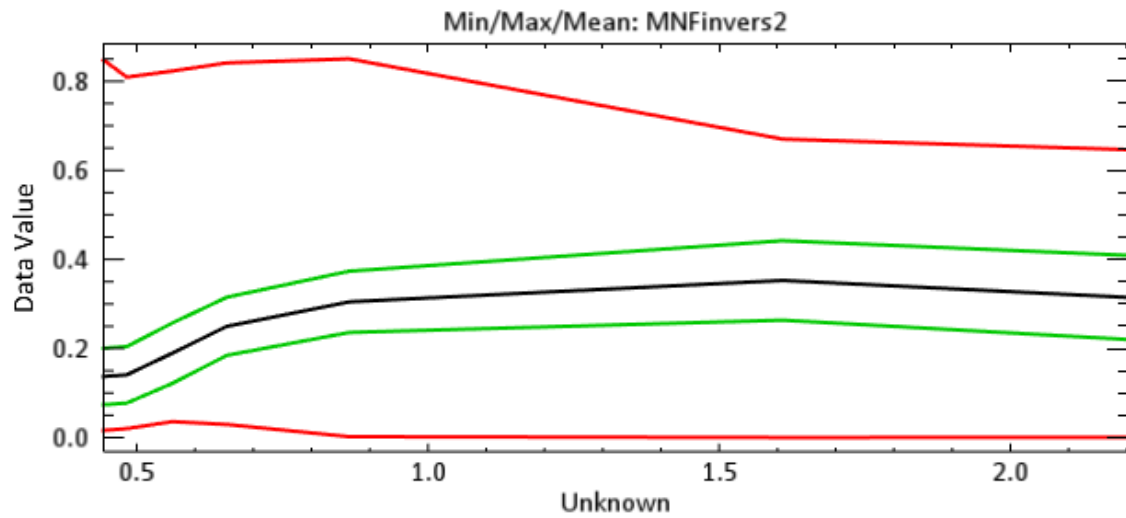
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.014300	0.847700	0.137063	0.063360
Band 2	0.013300	0.809400	0.140608	0.063445
Band 3	0.036300	0.822700	0.189515	0.067777
Band 4	0.032100	0.841100	0.249719	0.065291
Band 5	0.002400	0.850300	0.304660	0.068813
Band 6	0.000000	0.670000	0.352683	0.089225
Band 7	0.000000	0.646200	0.314616	0.094438

MNF Febrero | 2015



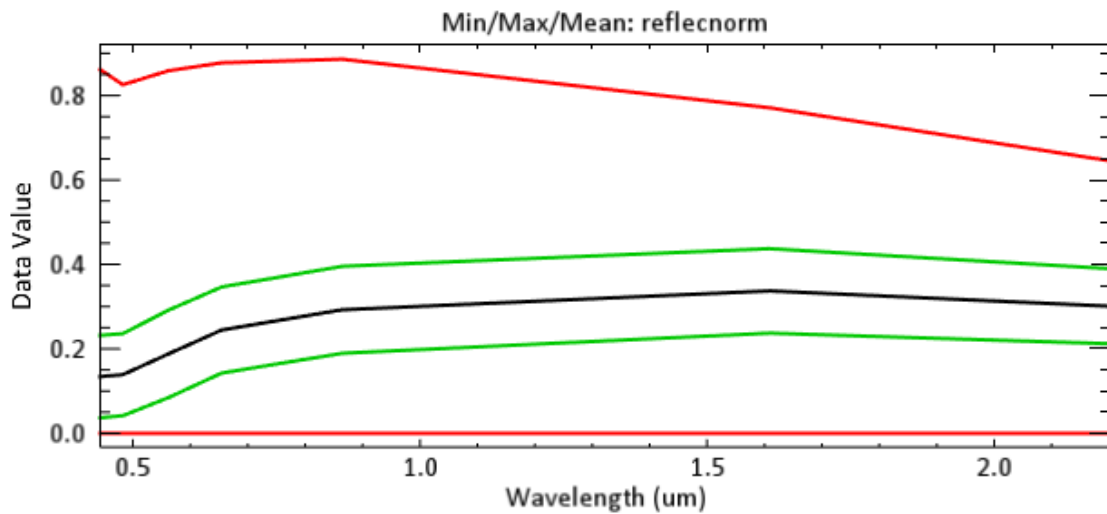
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	-72.713.562	30.649.826	-0.000000	15.474.025
Band 2	-50.920.166	36.637.867	-0.000000	7.306.983
Band 3	-22.284.784	49.979.351	-0.000000	6.704.437
Band 4	-57.759.758	36.257.809	0.000000	4.959.215
Band 5	-63.826.256	87.065.216	-0.000000	4.584.789
Band 6	-63.959.637	64.576.241	0.000000	3.160.249
Band 7	-11.271.720	10.872.236	-0.000000	1.004.593

## MNF INVERSE Febrero | 2015



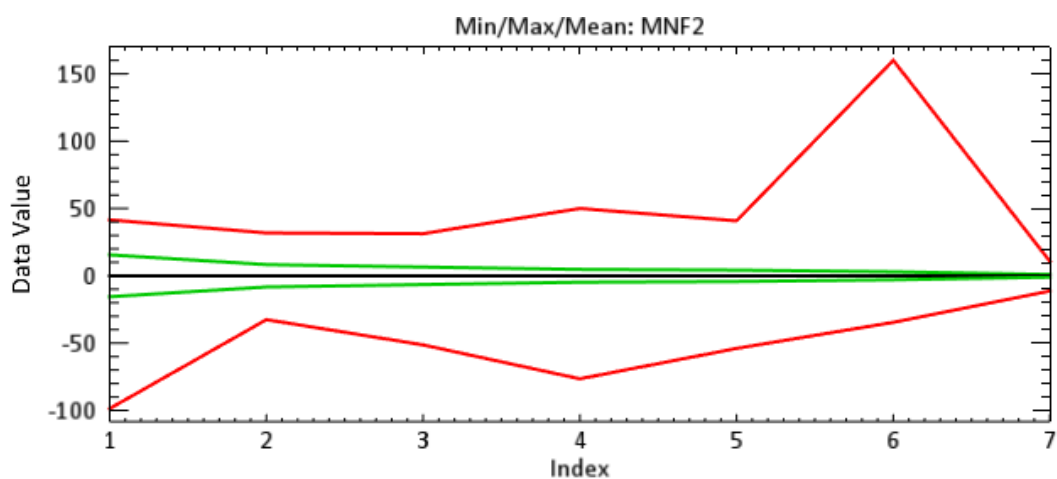
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.016133	0.847672	0.137063	0.063358
Band 2	0.019965	0.809209	0.140607	0.063429
Band 3	0.035712	0.822917	0.189514	0.067765
Band 4	0.029266	0.841230	0.249719	0.065287
Band 5	0.001865	0.850357	0.304663	0.068809
Band 6	0.000004	0.670038	0.352691	0.089210
Band 7	0.000267	0.646400	0.314623	0.094426

## REFLECTANCIA NORMALIZADA Agosto | 2015



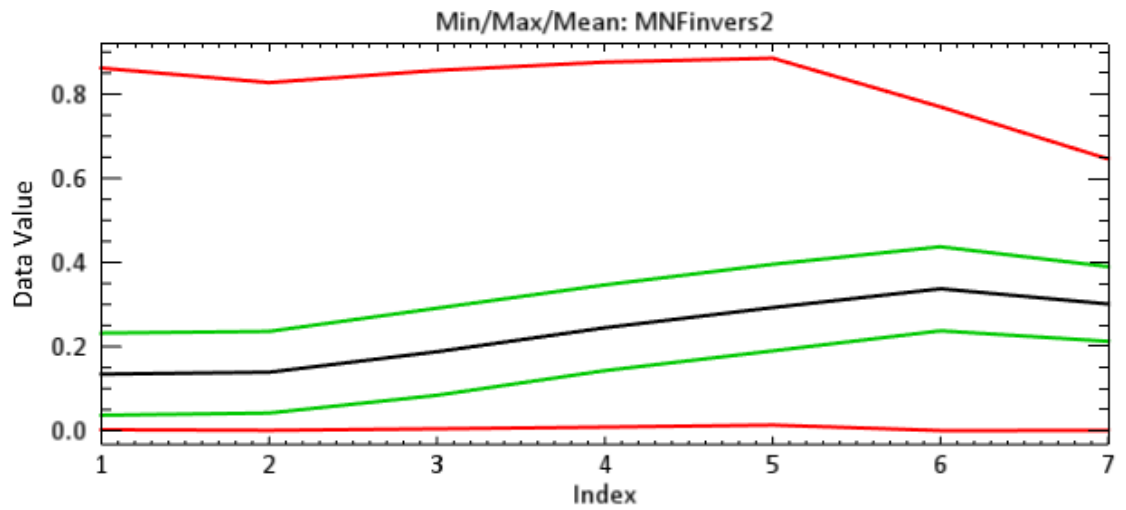
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.000000	0.861800	0.134160	0.097649
Band 2	0.000000	0.825500	0.138759	0.097122
Band 3	0.000000	0.858500	0.187491	0.103597
Band 4	0.000000	0.877400	0.244485	0.101968
Band 5	0.000000	0.886000	0.292392	0.103009
Band 6	0.000000	0.770900	0.337125	0.100047
Band 7	0.000000	0.645400	0.300936	0.088916

**MNF Agosto | 2015**



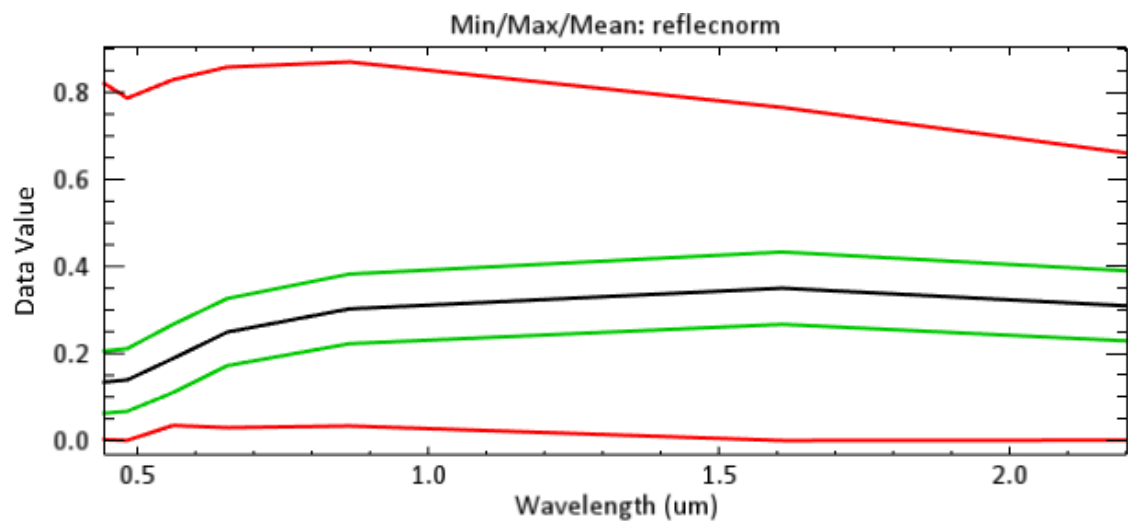
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	-98.659.592	41.566.685	0.000000	15.571.600
Band 2	-32.565.968	31.823.095	-0.000000	8.311.245
Band 3	-51.332.088	31.282.007	0.000000	6.514.897
Band 4	-76.512.001	50.018.349	0.000000	4.746.046
Band 5	-53.955.814	40.827.969	-0.000000	4.239.358
Band 6	-34.609.322	160.035.263	0.000000	2.964.030
Band 7	-11.286.199	10.641.546	-0.000000	0.995704

## MNF INVERSE Agosto | 2015



Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.001972	0.862075	0.134149	0.097639
Band 2	0.000492	0.827565	0.138745	0.097101
Band 3	0.004101	0.856518	0.187472	0.103567
Band 4	0.008256	0.876196	0.244483	0.101954
Band 5	0.013109	0.885607	0.292440	0.102955
Band 6	0.000024	0.769666	0.337195	0.099929
Band 7	0.000126	0.645696	0.300999	0.088812

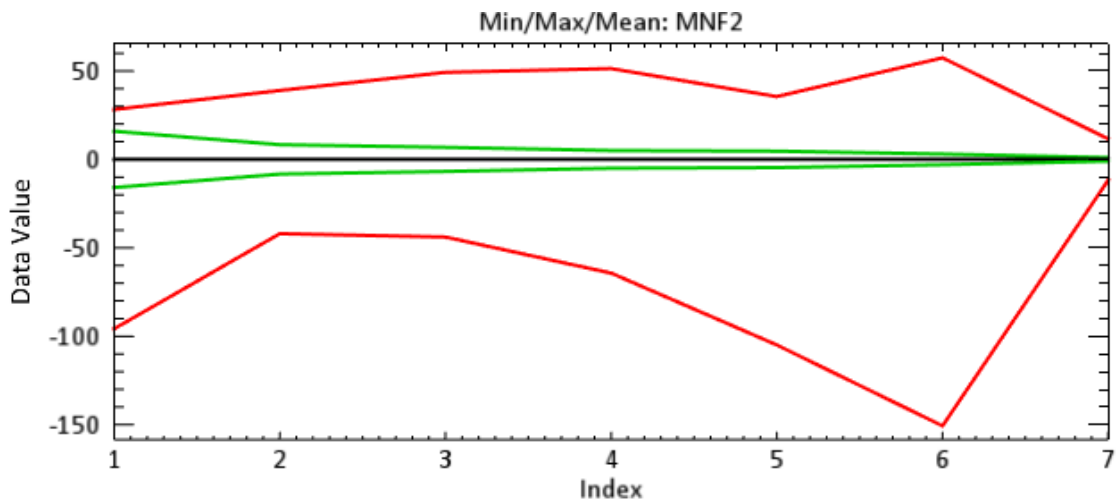
## REFLECTANCIA NORMALIZADA Enero | 2016





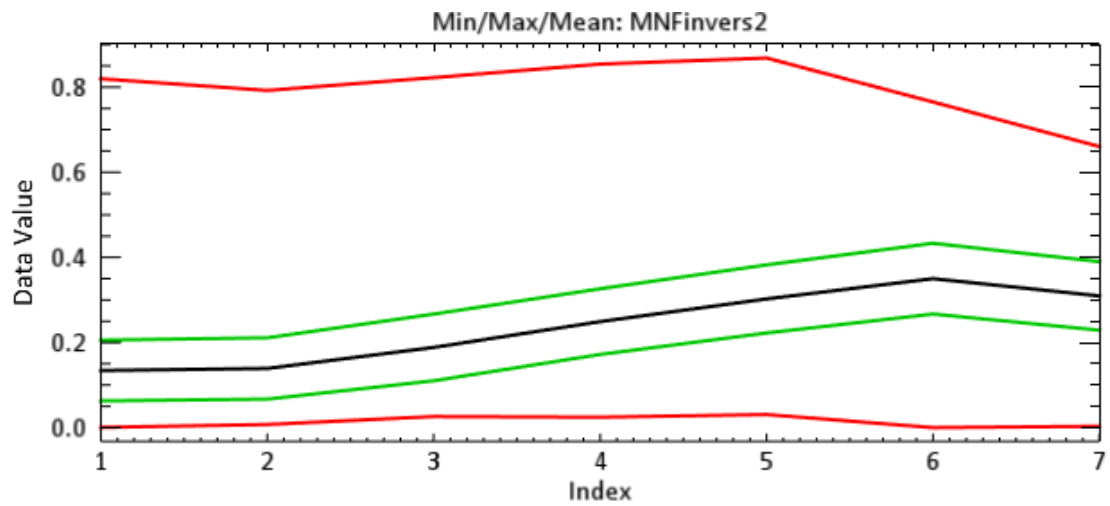
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.002100	0.820800	0.134281	0.071362
Band 2	0.000300	0.786600	0.139129	0.072042
Band 3	0.034700	0.829100	0.188514	0.078358
Band 4	0.029600	0.858100	0.249159	0.077133
Band 5	0.033500	0.869900	0.302479	0.080022
Band 6	0.000000	0.765400	0.350088	0.083130
Band 7	0.000800	0.660800	0.309528	0.080529

## MNF Enero | 2016



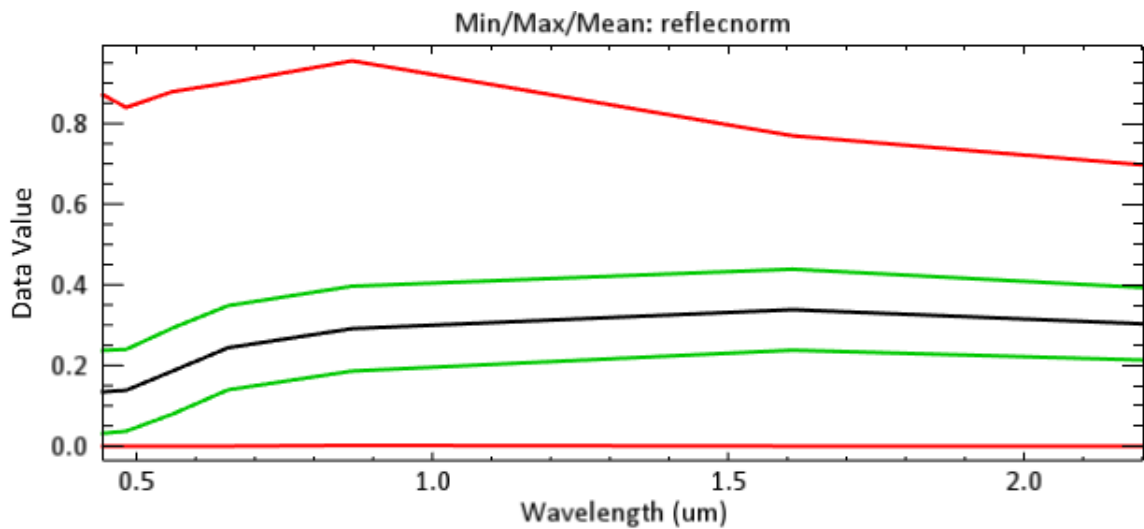
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	-95.812.675	28.197.931	0.000000	15.923.192
Band 2	-41.977.783	38.944.164	0.000000	8.312.914
Band 3	-43.895.710	49.188.202	0.000000	6.812.420
Band 4	-64.288.712	51.341.854	0.000000	5.002.910
Band 5	-104.919.601	35.502.369	0.000000	4.645.170
Band 6	-150.662.262	57.413.704	0.000000	3.022.662
Band 7	-11.737.324	11.582.323	-0.000000	1.003.461

## MNF INVERSE Enero | 2016



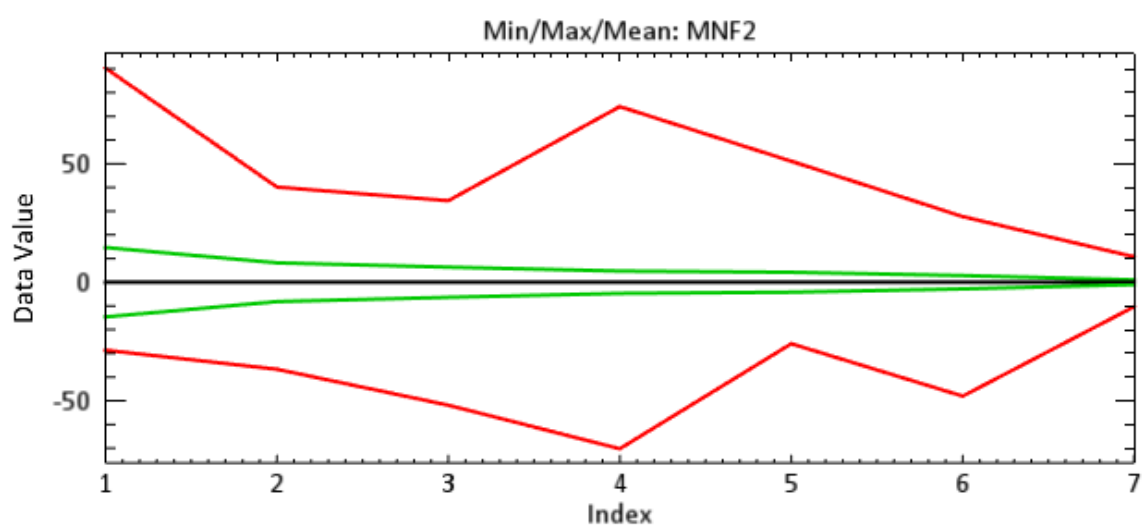
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.000646	0.819653	0.134281	0.071361
Band 2	0.007483	0.792319	0.139129	0.072037
Band 3	0.026151	0.822316	0.188514	0.078351
Band 4	0.024619	0.854144	0.249160	0.077130
Band 5	0.030906	0.868429	0.302479	0.080021
Band 6	0.000155	0.765079	0.350089	0.083128
Band 7	0.003205	0.660374	0.309529	0.080527

## REFLECTANCIA NORMALIZADA Agosto | 2016



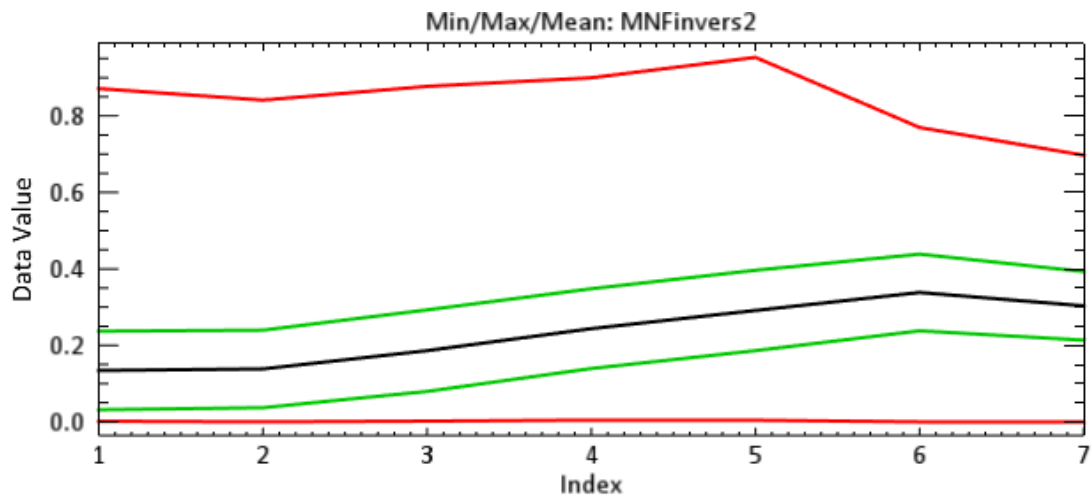
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.000000	0.871200	0.134393	0.102746
Band 2	0.000000	0.839700	0.138446	0.101379
Band 3	0.000000	0.878900	0.186244	0.106620
Band 4	0.000000	0.900500	0.243775	0.104318
Band 5	0.001600	0.955200	0.291230	0.105170
Band 6	0.000000	0.769300	0.338241	0.100413
Band 7	0.000000	0.697200	0.303221	0.089860

MNF Agosto | 2016



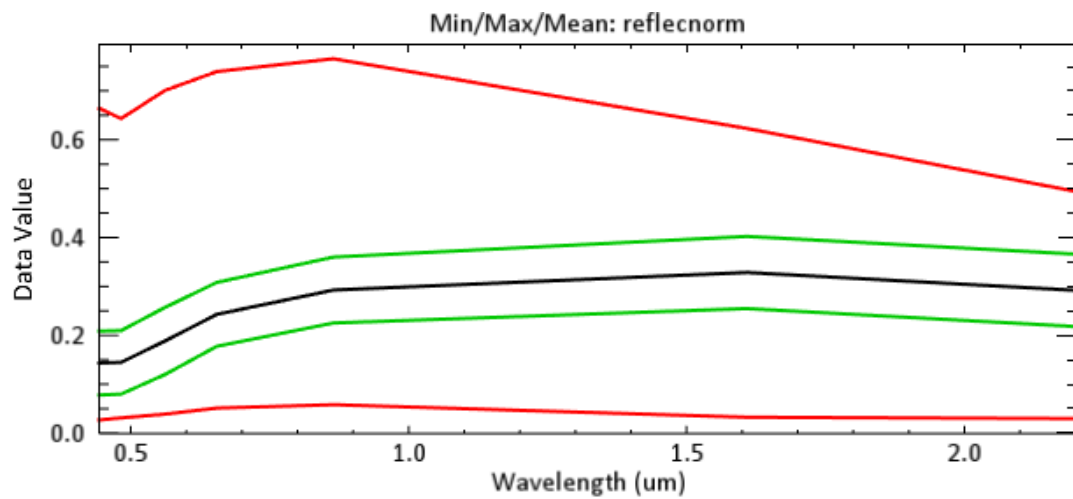
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	-28.652.016	90.328.796	-0.000000	14.647.414
Band 2	-36.700.039	40.149.986	-0.000000	8.180.781
Band 3	-51.865.585	34.397.839	0.000000	6.362.295
Band 4	-70.241.440	74.085.846	0.000000	4.707.177
Band 5	-25.936.918	51.040.653	0.000000	4.198.499
Band 6	-48.049.049	27.680.685	-0.000000	2.818.455
Band 7	-10.303.843	10.725.874	-0.000000	1.000.914

## MNF INVERSE Agosto | 2016



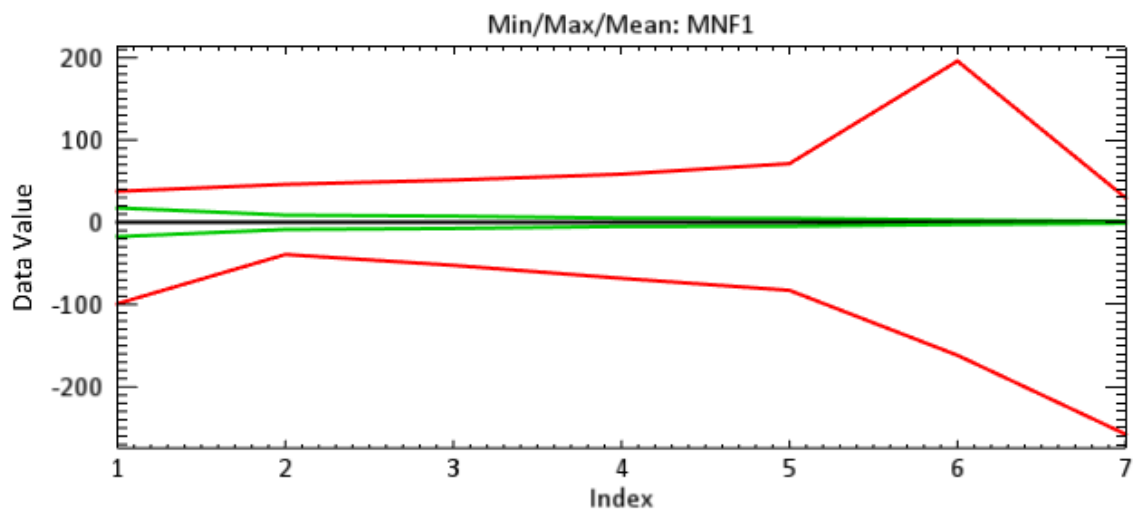
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.001638	0.871463	0.134374	0.102732
Band 2	0.000064	0.841347	0.138423	0.101354
Band 3	0.001957	0.877294	0.186216	0.106588
Band 4	0.004701	0.899719	0.243773	0.104306
Band 5	0.004337	0.953077	0.291301	0.105086
Band 6	0.000013	0.769709	0.338338	0.100250
Band 7	0.000040	0.697211	0.303307	0.089715

## REFLECTANCIA NORMALIZADA Febrero | 2017



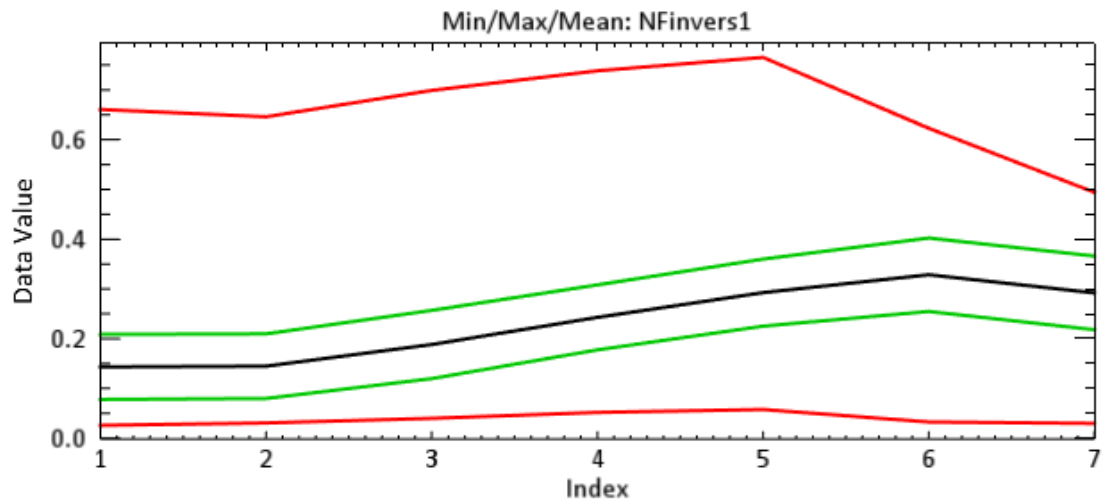
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.026700	0.664400	0.143256	0.065402
Band 2	0.031100	0.643200	0.144701	0.064958
Band 3	0.038700	0.700800	0.188271	0.068594
Band 4	0.051100	0.739400	0.242805	0.065317
Band 5	0.058100	0.765700	0.292574	0.067403
Band 6	0.032400	0.623000	0.328499	0.073818
Band 7	0.029700	0.494100	0.291992	0.074045

MNF Febrero | 2017



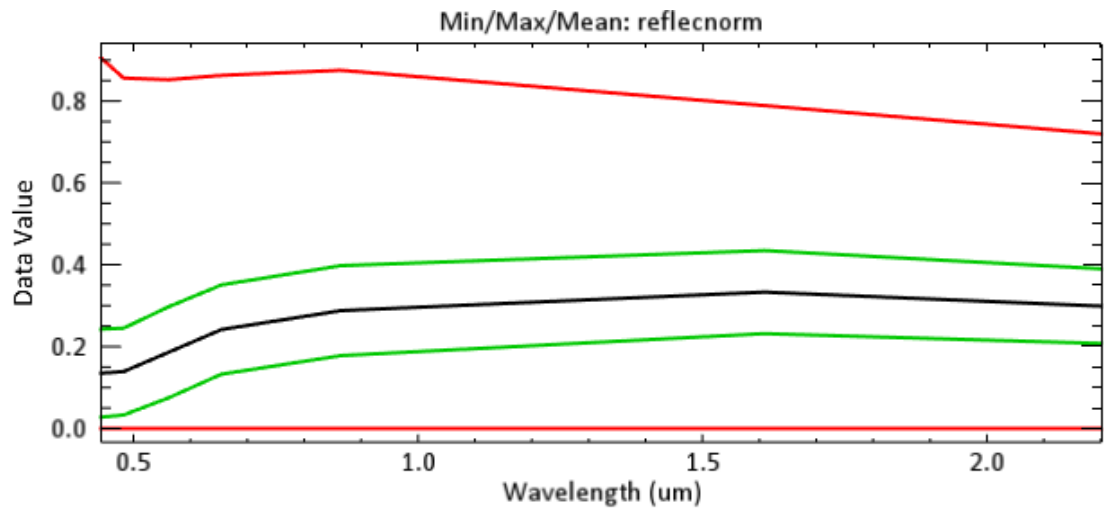
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	-98.997.261	37.574.104	-0.000000	17.497.145
Band 2	-39.159.836	46.085.888	-0.000000	8.741.373
Band 3	-52.337.341	51.276.875	0.000000	7.488.998
Band 4	-68.147.308	58.471.397	0.000000	5.092.449
Band 5	-82.748.543	71.289.734	-0.000000	4.798.556
Band 6	-161.718.903	195.951.599	-0.000000	2.677.569
Band 7	-257.611.237	29.829.885	-0.000000	1.307.413

## MNF INVERSE Febrero | 2017



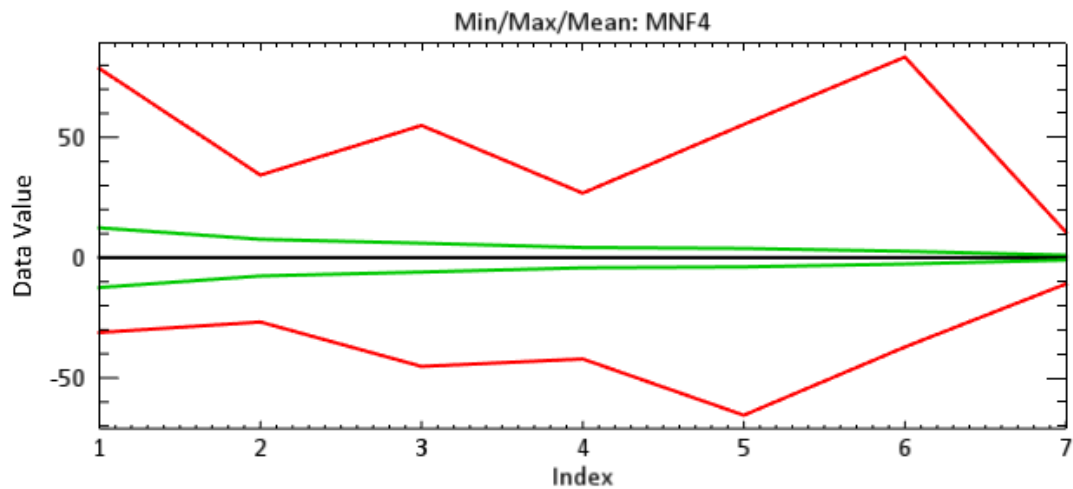
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.025769	0.660733	0.143256	0.065402
Band 2	0.030532	0.646003	0.144701	0.064950
Band 3	0.039862	0.699056	0.188271	0.068590
Band 4	0.051773	0.738390	0.242805	0.065316
Band 5	0.057625	0.765411	0.292574	0.067402
Band 6	0.032504	0.622884	0.328499	0.073818
Band 7	0.029728	0.494062	0.291992	0.074045

## REFLECTANCIA NORMALIZADA Agosto | 2017



Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.000000	0.905300	0.134989	0.107681
Band 2	0.000000	0.856000	0.138834	0.106042
Band 3	0.000000	0.852100	0.185713	0.111204
Band 4	0.000000	0.862600	0.241585	0.109111
Band 5	0.000000	0.875100	0.287780	0.109937
Band 6	0.000000	0.788800	0.333062	0.101472
Band 7	0.000000	0.719900	0.298794	0.091244

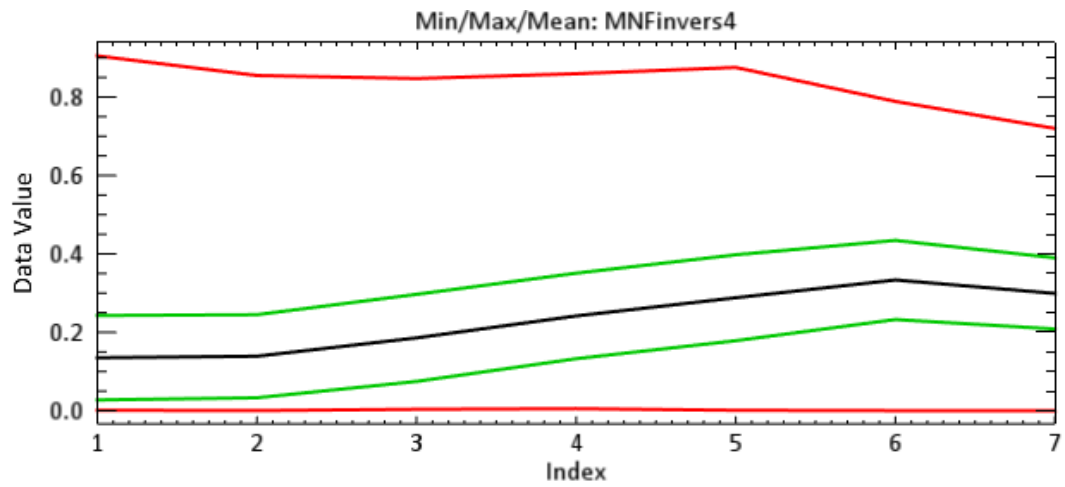
**MNF Agosto | 2017**



Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	-31.137659	78.652054	0.000000	12.412.214
Band 2	-26.770262	34.346020	-0.000000	7.624.541
Band 3	-45.239594	54.980743	-0.000000	6.003.173
Band 4	-42.138794	26.816204	0.000000	4.219.472
Band 5	-65.523758	55.414925	0.000000	3.847.170
Band 6	-37.145424	83.414337	-0.000000	2.653.673
Band 7	-10.906567	10.553646	-0.000000	1.004.225



## MNF INVERSE Agosto | 2017



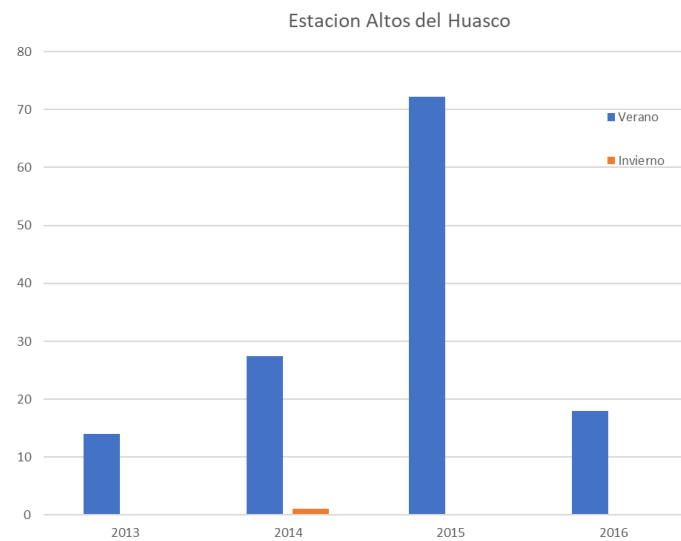
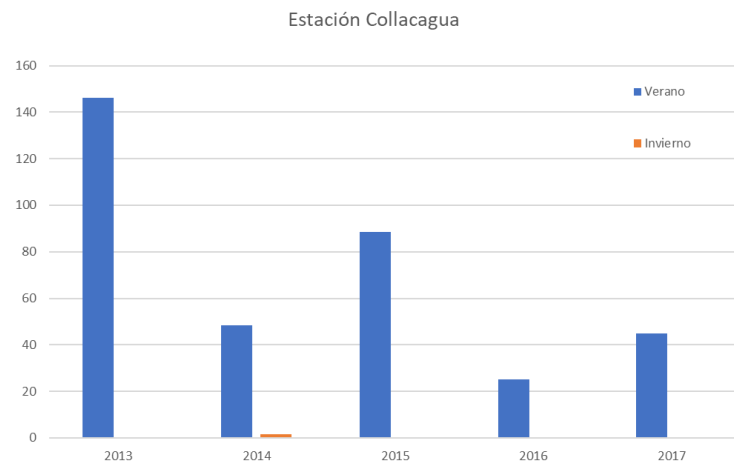
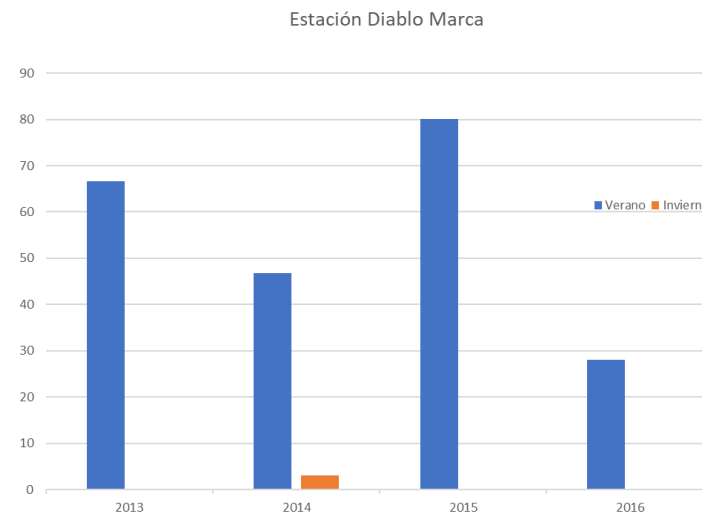
Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
Band 1	0.000979	0.905084	0.134989	0.107671
Band 2	0.000092	0.855043	0.138803	0.106010
Band 3	0.003466	0.847301	0.185624	0.111126
Band 4	0.005032	0.859558	0.241604	0.109084
Band 5	0.000921	0.875620	0.288042	0.109610
Band 6	-0.000011	0.788917	0.333381	0.100949
Band 7	0.000019	0.719974	0.299078	0.090781

#### **9.4 Anexo C**

*Datos pluviométricos de las estaciones de la cuenca del salar del Huasco*

	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual	Verano	Invierno
ESTACION SILLILICA	2011												39,6	39,6	0	
	2012	122,8	124,1	68	3,3	1,1	0	0	0	0	0	0	29	348,3	314,9	0
	2013	36,8	42,4	15,6	0	3,5	11,6	0	0,4	0	0	0	9,5	119,8	94,8	0,4
	2014	34,4	0,7	0	10,8	1,4	0	0	3,2	0	0	1,1	2,9	54,5	35,1	3,2
	2015	37,1	36,7	26,4	2,8			0		0	0	0		103	0	0
	2016	1	67											68	68	0
ESTACION DIABLO MARCA	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		Verano	Invierno
	2011												34,3	34,3	0	0
	2012	90,4	82	52,1	1,4	0	0	0	0	0	0	0	19,1	245	224,5	0
	2013	24,6	34,3	7,7			6,1	0	0	0	0,2	0	1	73,9	66,6	0
	2014	46,7	0	0,1	5	0,4	0	0	3	0	0,2	0,2	0	55,6	46,8	3
	2015	22,1	32,2	25,8	2,8			0		0	0	0		82,9	80,1	0
COLLACAGUA	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		Verano	Invierno
	2008	52	4,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,5	61,1	56,6	0
	2009	0	44	15	2	0	0	0	0	0	0	0	0	61	59	0
	2010	27,9	70,7	0,5	16,5	0	0	0	0	0	0	0	10	125,6	99,1	0
	2011	34,7	154,5	0	10,5	0	0	13,1	0	0	0	0	39,7	252,5	189,2	13,1
	2012	72,1	125,5	53,7	4,4	0	0	0	0	0,4	1	0,2	18,7	276	251,3	0
	2013	48,4	75,3	22,4	0	0	9,9	0	0	0	0	0	25,1	181,1	146,1	0
	2014	48,4	0	0	7,2	1,7	0	0	1,7	0	0,5	0,9	0	60,4	48,4	1,7
	2015	38,6	28,5	21,4	7,3	5,7	0	0	0	0	0	0	0	101,5	88,5	0
	2016	0	25	0	1	0	0				0	0	0	26	25	0
ALTOS DEL HUASCO	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		Verano	Invierno
	2011												18,4	18,4	0	0
	2012	48,5	75,2	16,9	0,4	0	0	0	0	0	0,1	0	5,9	147	140,6	0
	2013	5,8	5	3,2	0	6,9	6,8	0	0,1	0	0	0	0,1	27,9	14	0,1
	2014	27,5	0	0	4,3	2,3	0	0	1,1	0,1	0,1	0,7	0,4	36,5	27,5	1,1
	2015	33,6	26	12,6	0,8			0		0	0	0		73	72,2	0
	2016	2	16										0	18	18	0

Fuente : DGA



Fuente: DGA

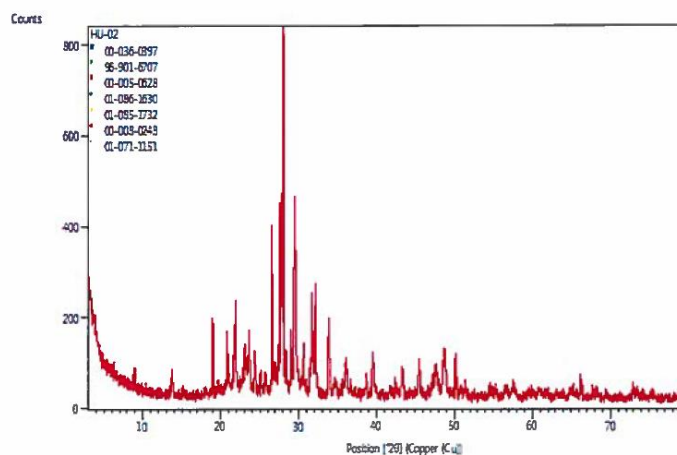
#### **9.4 ANEXO D**

*Datos de difracción de rayos X (DRX)*

## Muestra HU-02

### Anchor Scan Parameters

Dataset Name	HU-02
File name	C:\XRD Data\Arcillas\HU-02.xrdml
Sample Identification	HU-02
Comment	Configuration=SNMG_RT_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22
	Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
	Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
	Diffractometer system=XPRT-PRO
	Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS_RT_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4AB-6DD4-4B32-83A9-F61426796818}
	Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH_SC.xrdmp, Identifier={63A56457-EE1F-498E-9D0F-6D1CF1DD4530}
	PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)
Measurement Start Date/Time	21-02-2018 14:00:49
Operator	DRX
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2θ]	3.0042
End Position [°2θ]	79.9682
Step Size [°2θ]	0.0080
Scan Step Time [s]	24.8050
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [°2θ]	2.02
Offset [°2θ]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	0.2177
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [°C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	40 mA, 45 kV
Diffractometer Type	0000000000030722
Diffractometer Number	0
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes



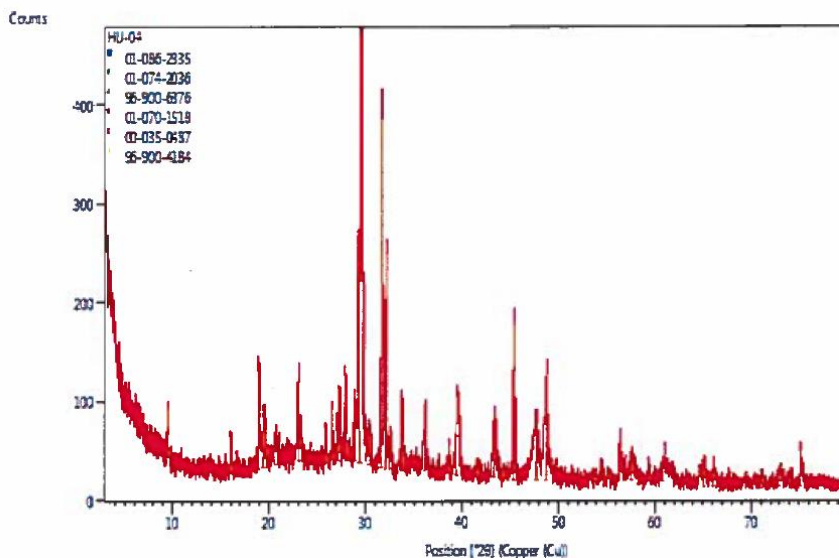
# **Pattern List**

Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	00-036-0397	51	Sodium Sulfate	0.000	0.404	Na <sub>2</sub> S O <sub>4</sub>
*	96-901-6707	48	Calcite	0.000	0.390	Ca <sub>6.00</sub> C <sub>6.00</sub> O <sub>18.00</sub>
*	00-005-0628	36	Sodium Chloride	0.000	0.241	Na Cl
*	01-086-1630	41	Silicon Oxide	0.000	0.467	Si O <sub>2</sub>
*	01-085-1732	16	Sodium Sulfate Carbonate	0.000	0.086	Na <sub>4</sub> ( S O <sub>4</sub> ) <sub>1.45</sub> ( C O <sub>3</sub> ) <sub>.55</sub>
*	00-008-0248	11	Sulfur	0.000	0.151	S
*	01-071-1151	29	Sodium Aluminum Silicate	0.000	0.438	Na ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )

## Muestra HU-04

### Anchor Scan Parameters

Dataset Name HU-04  
 File name C:\XRD Data\Arcillas\HU-04.xrdml  
 Sample Identification HU-04  
 Comment Configuration=SNGM\_RT\_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22  
 Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001  
 Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1  
 Diffractometer system=XPERT-PRO  
 Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS\_RT\_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4A8-6DD4-4B32-83A9-F61426796818}  
 Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH\_SC.xrdmp, Identifier={A42BA58F-27A9-442B-8B14-462549C86E8E}  
 PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)  
 Measurement Start Date/Time 22-02-2018 9:48:28  
 Operator DRX  
 Raw Data Origin XRD measurement (\*.XRDML)  
 Scan Axis Gonio  
 Start Position [°2θ] 3.0042  
 End Position [°2θ] 79.9882  
 Step Size [°2θ] 0.0080  
 Scan Step Time [s] 24.8050  
 Scan Type Continuous  
 PSD Mode Scanning  
 PSD Length [°2θ] 2.02  
 Offset [°2θ] 0.0000  
 Divergence Slit Type Fixed  
 Divergence Slit Size [°] 0.2177  
 Specimen Length [mm] 10.00  
 Measurement Temperature [°C] 25.00  
 Anode Material Cu  
 K-Alpha1 [Å] 1.54060  
 K-Alpha2 [Å] 1.54443  
 K-Beta [Å] 1.39225  
 K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000  
 Generator Settings 40 mA, 45 kV  
 Diffractometer Type 000000000030722  
 Diffractometer Number 0  
 Goniometer Radius [mm] 240.00  
 Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00  
 Incident Beam Monochromator No  
 Spinning Yes



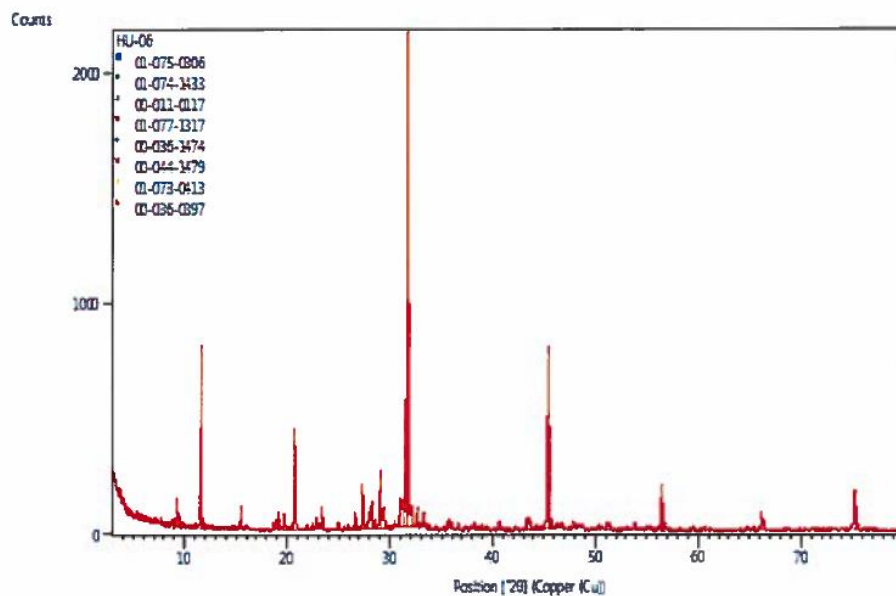


Pattern List						
Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	01-086-2335	55	Magnesium Calcium Carbonate	0.000	0.877	( Mg.064 Ca.936 ) ( C O3 )
*	01-074-2036	51	Sodium Sulfate	0.000	0.394	Na2 S O4
*	96-900-6376	51	Halite	0.000	0.642	Na4.00 Cl4.00
*	01-070-1518	20	Sodium Nitrate	0.000	0.421	Na N O3
*	00-035-0487	15	Sodium Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.170	Na4 Ca ( S O4 )3 !2 H2 O
*	96-900-4184	12	Blodite	0.000	0.130	Na4.00 Mg2.00 S4.00 O24.00 H16.00

## Muestra HU-06

### Anchor Scan Parameters

Dataset Name HU-06  
 File name C:\XRD Data\Arcillas\HU-06.xrdml  
 Sample Identification HU-06  
 Comment Configuration=SNGM\_RT\_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22  
 Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001  
 Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1  
 Diffractometer system=XPERT-PRO  
 Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS\_RT\_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4A8-6DD4-4B32-B3A9-F61426796818}  
 Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH\_SC.xrdmp, Identifier={A42BA58F-27A9-442B-8B14-462549C86E8E}  
 PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)  
 Measurement Start Date/Time 22-02-2018 10:54:59  
 Operator DRX  
 Raw Data Origin XRD measurement (\*.XRDML)  
 Scan Axis Goni  
 Start Position [°2θ] 3.0042  
 End Position [°2θ] 79.9882  
 Step Size [°2θ] 0.0080  
 Scan Step Time [s] 24.8050  
 Scan Type Continuous  
 PSD Mode Scanning  
 PSD Length [°2θ] 2.02  
 Offset [°2θ] 0.0000  
 Divergence Slit Type Fixed  
 Divergence Slit Size [°] 0.2177  
 Specimen Length [mm] 10.00  
 Measurement Temperature [°C] 25.00  
 Anode Material Cu  
 K-Alpha1 [Å] 1.54060  
 K-Alpha2 [Å] 1.54443  
 K-Beta [Å] 1.39225  
 K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000  
 Generator Settings 40 mA, 45 kV  
 Diffractometer Type 0000000000030722  
 Diffractometer Number 0  
 Goniometer Radius [mm] 240.00  
 Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00  
 Incident Beam Monochromator No  
 Spinning Yes



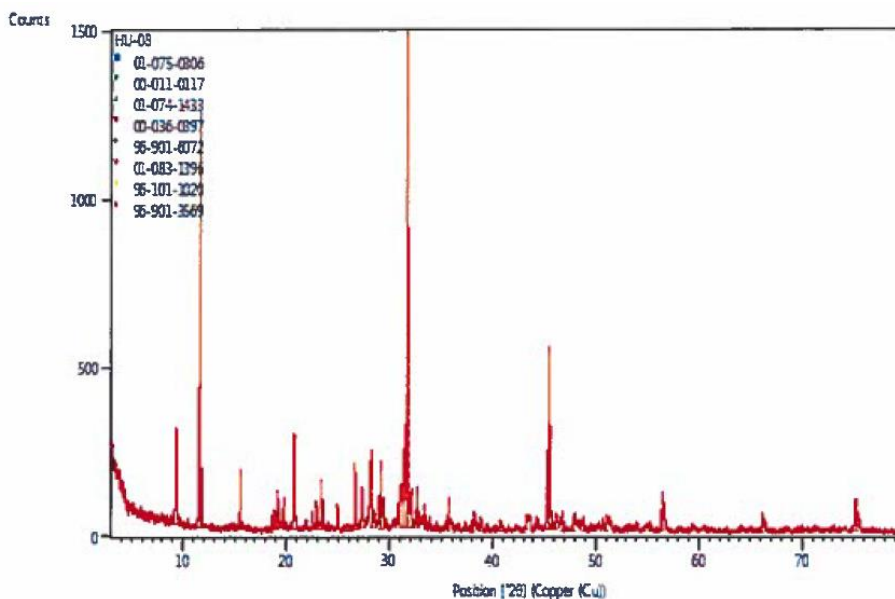
#### Pattern List

Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	01-075-0306	53	Sodium Chloride	0.000	0.678	Na Cl
*	01-074-1433	42	Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.168	Ca ( S O4 ) ( H2 O )2
*	00-011-0117	40	Potassium Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.066	K2 Ca ( S O4 )2 ! H2 O
*	01-077-1317	11	Silicon Oxide	0.000	0.011	Si O2
*	00-036-1474	20	Sodium Nitrate	0.000	0.038	Na N O3
*	00-044-1479	16	Sodium Calcium Aluminum Silicate Hydrate	0.000	0.043	( Na , K ) Ca2 Al5 Si13 O36 !14 H2 O
*	01-073-0413	13	Calcium Borate Hydrate	0.000	0.064	Ca B3 O3 ( O H )5 ( H2 O )4
*	00-036-0397	16	Sodium Sulfate	0.000	0.028	Na2 S O4

## HU-08

### Anchor Scan Parameters

Dataset Name	HU-08
File name	C:\XRD Data\Arcillas\HU-08.xrdml
Sample Identification	HU-08
Comment	Configuration=SNMG_RT_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22
	Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size ZTheta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
	Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
	Diffractometer system=XPERT-PRO
	Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS_RT_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4A8-6DD4-4B32-83A9-F61426796818}
	Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH_SC.xrdmp, Identifier={63A56457-EE1F-498E-9D0F-6D1CF1DD4530}
	PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)
Measurement Start Date/Time	21-02-2018 13:27:35
Operator	DRX
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2θ]	3.0042
End Position [°2θ]	79.9882
Step Size [°2θ]	0.0080
Scan Step Time [s]	24.8050
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [°2θ]	2.02
Offset [°2θ]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	0.2177
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [°C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	40 mA, 45 kV
Diffractometer Type	000000000030722
Diffractometer Number	0
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

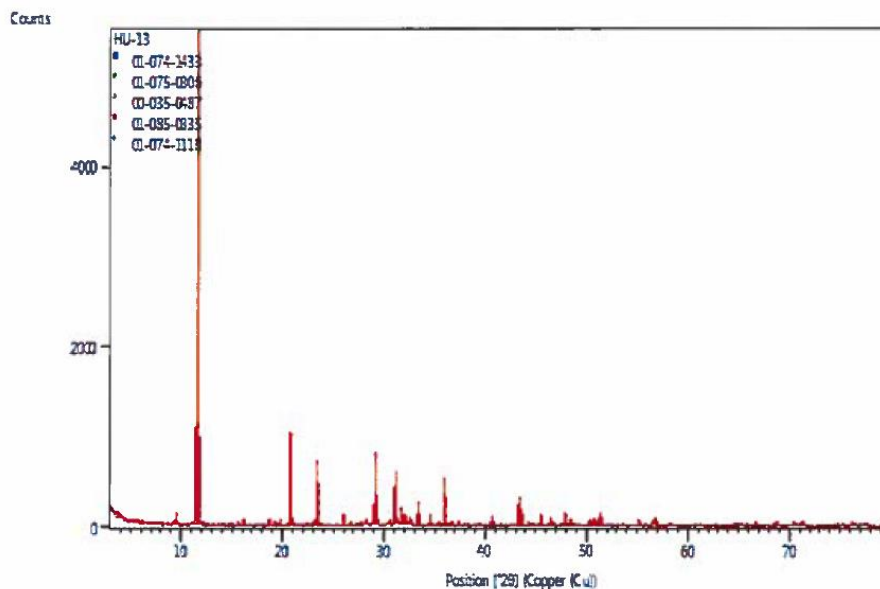


Pattern List						
Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	01-075-0306	52	Sodium Chloride	0.000	0.877	Na Cl
*	00-011-0117	51	Potassium Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.132	K <sub>2</sub> Ca ( S O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O
*	01-074-1433	45	Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.361	Ca ( S O <sub>4</sub> ) ( H <sub>2</sub> O ) <sub>2</sub>
*	00-036-0397	27	Sodium Sulfate	0.000	0.058	Na <sub>2</sub> S O <sub>4</sub>
*	96-901-6072	12	Aragonite	0.000	0.050	Ca <sub>4</sub> .00 C <sub>4</sub> .00 O <sub>12</sub> .00
*	01-083-1396	11	Calcium Borate Chloride Hydrate	0.000	0.279	Ca <sub>2</sub> ( B <sub>5</sub> O <sub>9</sub> ) Cl ( H <sub>2</sub> O )
*	96-101-1020	13	Aphthitalite	0.000	0.247	Na <sub>1</sub> .00 K <sub>3</sub> .00 S <sub>2</sub> .00 O <sub>8</sub> .00
*	96-901-3569	12	Realgar	0.000	0.101	As <sub>16</sub> .00 S <sub>16</sub> .00

## HU-14

### Anchor Scan Parameters

Dataset Name HU-13  
 File name C:\XRD Data\Arcillas\HU-13.xrdml  
 Sample Identification HU-13  
 Comment Configuration=SNMG\_RT\_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22  
 Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001  
 Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1  
 Diffractometer system=XPERT-PRO  
 Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS\_RT\_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4A8-6DD4-4B32-83A9-F61426796818}  
 Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH\_SC.xrdmp, Identifier={63A56457-EE1F-498E-9D0F-6D1CF1DD4530}  
 PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)  
 Measurement Start Date/Time 21-02-2018 15:40:32  
 Operator DRX  
 Raw Data Origin XRD measurement (\*.XRDML)  
 Scan Axis Goni  
 Start Position [°2θ] 3.0042  
 End Position [°2θ] 79.9882  
 Step Size [°2θ] 0.0080  
 Scan Step Time [s] 24.8050  
 Scan Type Continuous  
 PSD Mode Scanning  
 PSD Length [°2θ] 2.02  
 Offset [°2θ] 0.0000  
 Divergence Slit Type Fixed  
 Divergence Slit Size [°] 0.2177  
 Specimen Length [mm] 10.00  
 Measurement Temperature [°C] 25.00  
 Anode Material Cu  
 K-Alpha1 [Å] 1.54060  
 K-Alpha2 [Å] 1.54443  
 K-Beta [Å] 1.39225  
 K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000  
 Generator Settings 40 mA, 45 kV  
 Diffractometer Type 0000000000030722  
 Diffractometer Number 0  
 Goniometer Radius [mm] 240.00  
 Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00  
 Incident Beam Monochromator No  
 Spinning Yes



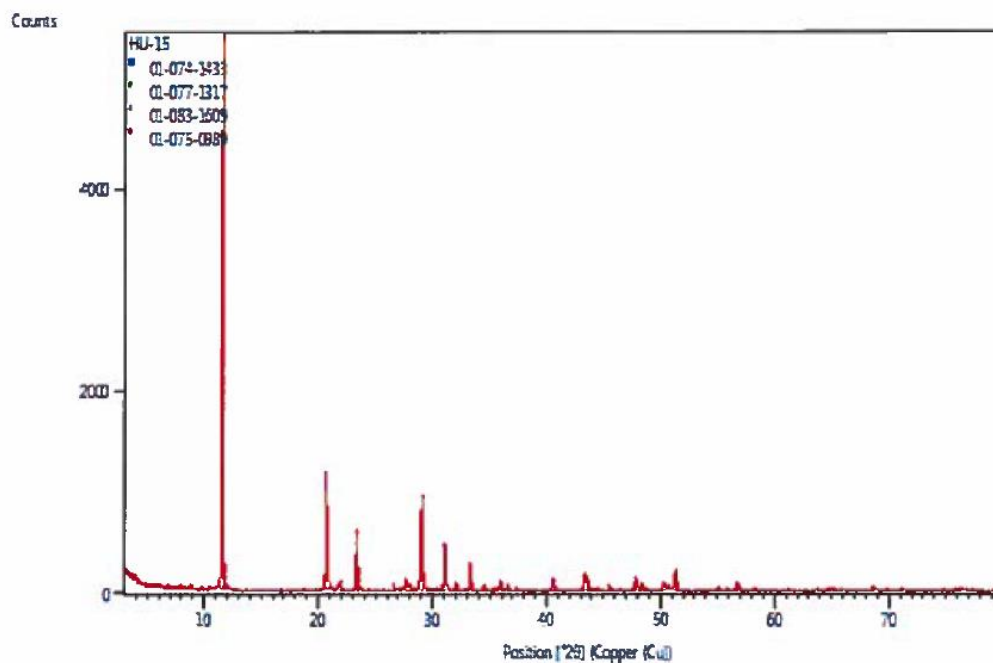
# **Pattern List**

Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	01-074-1433	64	Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.398	Ca ( S O4 ) ( H2 O )2
*	01-075-0306	39	Sodium Chloride	0.000	0.033	Na Cl
*	00-035-0487	19	Sodium Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.030	Na4 Ca ( S O4 )3 12 H2 O
*	01-085-0335	8	Silicon Oxide	0.000	0.006	Si O2
*	01-074-1118	10	Potassium Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.014	K2 Ca ( S O4 )2 ( H2 O )

## Muestra HU-15

### Anchor Scan Parameters

Dataset Name HU-15  
 File name C:\XRD Data\Arcillas\HU-15.xrdml  
 Sample Identification HU-15  
 Comment Configuration=SNGM\_RT\_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22  
 Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001  
 Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1  
 Diffractometer system=XPRT-PRO  
 Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS\_RT\_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4A8-6DD4-4B32-83A9-F61426796816}  
 Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH\_SC.xrdmp, Identifier={63A56457-EE1F-498E-9D0F-6D1CF1DD4530}  
 PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)  
 Measurement Start Date/Time 21-02-2018 14:34:03  
 Operator DRX  
 Raw Data Origin XRD measurement (\*.XRDML)  
 Scan Axis Goni  
 Start Position [ $^{\circ}2\theta$ ] 3.0042  
 End Position [ $^{\circ}2\theta$ ] 79.9882  
 Step Size [ $^{\circ}2\theta$ ] 0.0080  
 Scan Step Time [s] 24.8050  
 Scan Type Continuous  
 PSD Mode Scanning  
 PSD Length [ $^{\circ}2\theta$ ] 2.02  
 Offset [ $^{\circ}2\theta$ ] 0.0000  
 Divergence Slit Type Fixed  
 Divergence Slit Size [ $^{\circ}$ ] 0.2177  
 Specimen Length [mm] 10.00  
 Measurement Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ] 25.00  
 Anode Material Cu  
 K-Alpha1 [ $\text{\AA}$ ] 1.54060  
 K-Alpha2 [ $\text{\AA}$ ] 1.54443  
 K-Beta [ $\text{\AA}$ ] 1.39225  
 K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000  
 Generator Settings 40 mA, 45 kV  
 Diffractometer Type 0000000000030722  
 Diffractometer Number 0  
 Goniometer Radius [mm] 240.00  
 Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00  
 Incident Beam Monochromator No  
 Spinning Yes

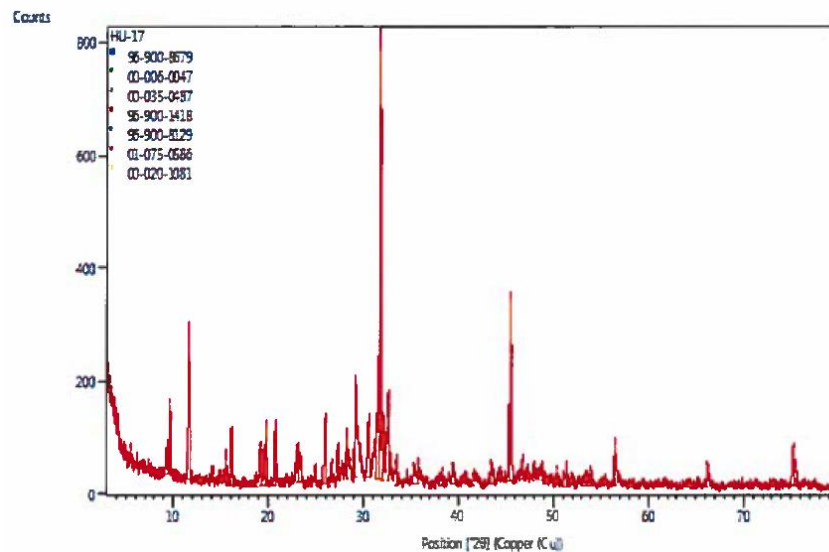


Pattern List						
Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	01-074-1433	56	Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.314	Ca ( S O <sub>4</sub> ) ( H <sub>2</sub> O ) <sub>2</sub>
*	01-077-1317	17	Silicon Oxide	0.000	0.016	Si O <sub>2</sub>
*	01-083-1609	15	Sodium Aluminum Silicate	0.000	0.016	Na ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )
*	01-075-0989	10	Calcium Boron Hydroxide Hydrate	0.000	0.025	Ca ( B ( O H ) <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ( H <sub>2</sub> O ) <sub>2</sub>

## HU-17

### Anchor Scan Parameters

Dataset Name HU-17  
 File name C:\XRD Data\Arcillas\HU-17.xrdml  
 Sample Identification HU-17  
 Comment Configuration=SNGM\_RT\_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22  
 Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001  
 Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1  
 Diffractometer system=XPERT-PRO  
 Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS\_RT\_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4AB-6DD4-4B32-83A9-F61426796818}  
 Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH\_SC.xrdmp, Identifier={A42BAS8F-27A9-442B-8B14-462549C86E8E}  
 PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)  
 Measurement Start Date/Time 22-02-2018 10:21:44  
 Operator DRX  
 Raw Data Origin XRD measurement (\*.XRDML)  
 Scan Axis Gonio  
 Start Position [°2θ] 3.0042  
 End Position [°2θ] 79.9882  
 Step Size [°2θ] 0.0080  
 Scan Step Time [s] 24.8050  
 Scan Type Continuous  
 PSD Mode Scanning  
 PSD Length [°2θ] 2.02  
 Offset [°2θ] 0.0000  
 Divergence Silt Type Fixed  
 Divergence Silt Size [°] 0.2177  
 Specimen Length [mm] 10.00  
 Measurement Temperature [°C] 25.00  
 Anode Material Cu  
 K-Alpha1 [Å] 1.54060  
 K-Alpha2 [Å] 1.54443  
 K-Beta [Å] 1.39225  
 K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000  
 Generator Settings 40 mA, 45 kV  
 Diffractometer Type 000000000030722  
 Diffractometer Number 0  
 Goniometer Radius [mm] 240.00  
 Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00  
 Incident Beam Monochromator No  
 Spinning Yes



#### Pattern List

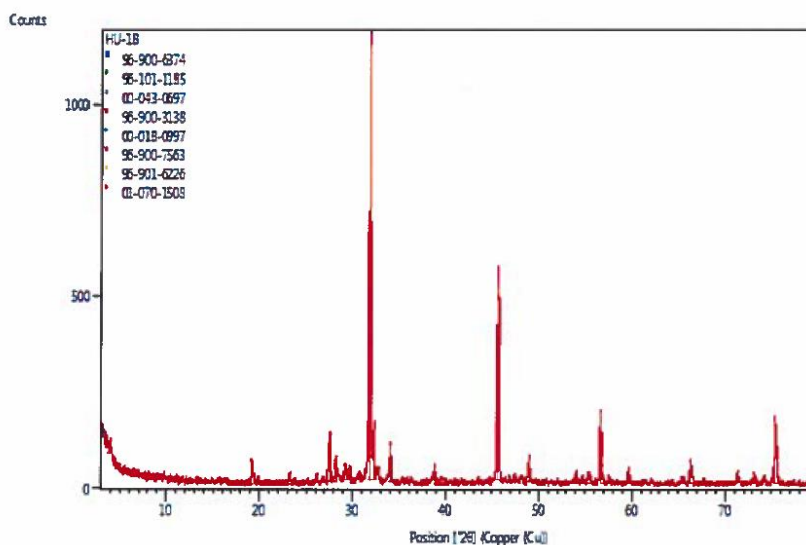
Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	96-900-8679	53	Halite	0.000	0.817	Na4.00 Cl4.00
*	00-006-0047	38	Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.304	Ca S O4 12 H2 O
*	00-035-0487	29	Sodium Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.177	Na4 Ca ( S O4 )3 12 H2 O
*	96-900-1418	20	Dolomite	0.000	0.143	Ca3.00 Mg3.00 C6.00 O18.00
*	96-900-8129	28	Syngenite	0.000	0.152	K4.00 Ca2.00 S4.00 O18.00 H4.00
*	01-075-0586	11	Potassium Aluminum Sulfate Hydrate	0.000	0.074	K Al ( S O4 )2 ( H2 O )12
*	00-020-1081	18	Sodium Borate Hydrate	0.000	0.180	Na B3 O5 12 H2 O



## HU-18

### Anchor Scan Parameters

Dataset Name HU-18  
 File name C:\XRD Data\Arcillas\HU-18.xrdml  
 Sample Identification HU-18  
 Comment Configuration=SNMG\_RT\_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22  
 Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001  
 Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1  
 Diffractometer system=XPRT-PRO  
 Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS\_RT\_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4A8-6DD4-4B32-83A9-F61426796818}  
 Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH\_5C.xrdmp, Identifier={A42BA58F-27A9-442B-8B14-462549C86E8E}  
 PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)  
 Measurement Start Date/Time 22-02-2018 12:01:28  
 Operator DRX  
 Raw Data Origin XRD measurement (\*.XRDML)  
 Scan Axis Goni  
 Start Position [°2θ] 3.0042  
 End Position [°2θ] 79.9882  
 Step Size [°2θ] 0.0080  
 Scan Step Time [s] 24.8050  
 Scan Type Continuous  
 PSD Mode Scanning  
 PSD Length [°2θ] 2.02  
 Offset [°2θ] 0.0000  
 Divergence Slit Type Fixed  
 Divergence Slit Size [°] 0.2177  
 Specimen Length [mm] 10.00  
 Measurement Temperature [°C] 25.00  
 Anode Material Cu  
 K-Alpha1 [Å] 1.54060  
 K-Alpha2 [Å] 1.54443  
 K-Beta [Å] 1.39225  
 K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000  
 Generator Settings 40 mA, 45 kV  
 Diffractometer Type 0000000000030722  
 Diffractometer Number 0  
 Goniometer Radius [mm] 240.00  
 Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00  
 Incident Beam Monochromator No  
 Spinning Yes



Pattern List						
Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	96-900-6374	51	Halite	0.000	0.616	Na4.00 Cl4.00
*	96-101-1185	30	Thenardite	0.000	0.091	S8.00 Na16.00 O32.00
*	00-043-0697	17	Calcium Magnesium Carbonate	0.000	0.049	( Ca , Mg ) C O3
*	96-900-3138	21	Sylvite	0.000	0.064	K4.00 Cl4.00
*	00-018-0997	18	Potassium Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.122	K2 Ca5 ( S O4 )6 ! H2 O
*	96-900-7563	16	Nitratine	0.000	0.042	Na6.00 N6.00 O18.00
*	96-901-6226	7	Cristobalite II	0.000	0.029	Si8.00 O16.00
*	01-070-1508	11	Potassium Sodium Chloride Carbonate Sulfate	0.000	0.032	K Na22 ( Cl ( C O3 )2 ( S O4 )9 )